



Dimensionamento e Simulação de Redes Privadas 5G

RAFAEL JOSÉ DE CASTRO DE SOUSA

Licenciado em Engenharia Informática, Redes e Telecomunicações

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Mestrado em Engenharia Eletrónica e
Telecomunicações, na Área de Especialização de Telecomunicações

Orientador (es):

Doutor Pedro Manuel de Almeida Caralho Vieira

Dimensionamento e Simulação de Redes Privadas 5G

RAFAEL JOSÉ DE CASTRO DE SOUSA

Licenciado em Engenharia Informática, Redes e Telecomunicações

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Mestrado em Engenharia Eletrónica e
Telecomunicações, na Área de Especialização de Telecomunicações

Orientador (es):

Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira (ISEL/Instituto de
Telecomunicações)

Setembro 2024

Agradecimentos

Primeiramente, quero exprimir o meu agradecimento aos meus pais e ao resto da minha família que me acompanhou tanto na minha vida como no mundo académico, permitindo que eu tenha as melhores condições para prosperar. Em seguida queria deixar uma palavra de gratidão ao acompanhamento e orientação do Engenheiro Pedro Vieira, e um agradecimento especial aos Engenheiros Márcio Pereira, Madalena Cilínio e Marco Sousa da CELFINET pela partilha de conhecimentos e sugestões dadas. Por fim queria agradecer ao Instituto de Telecomunicações (IT) pelo suporte do mesmo.

Declaração de Integridade

Declaro que esta(e) dissertação / trabalho de projeto / relatório de estágio é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor



Lisboa, 12 de Setembro de 2024

Resumo

A introdução da tecnologia de comunicações móveis de Quinta Geração (5G) está a abrir o caminho para a quarta revolução industrial rumo à transformação digital das aplicações de alguns setores industriais verticais tais como: a agricultura, saúde e produção industrial. A solução ideal para a implementação deste tipo de redes centra-se nas redes privadas, onde se deve considerar uma gama variável de requisitos, como latências reduzidas, *throughput* elevado, elevada densidade de dispositivos, sendo a sua implementação um processo desafiante. Assim, o objetivo desta dissertação consiste no estudo, planeamento e simulação de redes privadas.

Inicialmente fez-se um estudo detalhado dos cenários a implementar para apurar requisitos a cumprir e realizar a sua parametrização de forma a calcular o *link budget*, e fazer o posicionamento das estações base. Foram dimensionados cinco cenários: urbano, rural, *High Speed Train* (HST), *Smart Street Lighting* (SSL) simulados com o *Radio Mobile - RF propagation simulation software* e *Smart Parking* (SP) com o *Vienna 5G SL simulator*. Os dois primeiros representam redes públicas.

Após as simulações com o *Radio Mobile* obtiveram-se as respetivas percentagens de cobertura de 96.43%, 99.92%, 89.78% e 98.43%. Nos cenários referentes a redes públicas o requisito de cobertura (95%) já é cumprido, no entanto o HST e SSL encontram-se abaixo do mínimo de 95% e 99%. Após algumas otimizações foi possível garantir uma cobertura de 98.33% e 99.55%. No cenário SP a intensidade do sinal recebido em cada sensor foi simulada nas frequências de 28 GHz e 3.5GHz. Nos 3.5 GHz todos os sensores cumprem este requisito, já nos 28 GHz quando deixa de haver linha de vista, mesmo com aumento de potência de transmissão, 59.3% dos sensores não tinham nível de sinal suficiente. Neste cenário foram analisados outros indicadores de desempenho como o *throughput*, *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio* (SINR) e *Channel Quality Indicator* (CQI).

Palavras-chave: 5G; Modelo de Propagação; Planeamento; Redes Privadas; Simulador.

Abstract

The introduction of Fifth Generation mobile communications technology (5G) is paving the way for the fourth industrial revolution towards the digital transformation of applications in vertical industrial sectors such as: agriculture, health and industrial production. The ideal solution for implementing this type of network focuses on private networks, where a variable range of requirements must be considered, such as low latency, high throughput, high device density, and implementation is a challenging process. The aim of this dissertation is therefore to study, plan and simulate private networks.

Initially, a detailed study of the scenarios to be implemented was carried out to determine the requirements to be met and to parameterize them to calculate the link budget and position the base stations. Five scenarios were dimensioned: urban, rural, High Speed Train (HST), Smart Street Lighting (SSL) simulated with Radio Mobile - RF propagation simulation software and Smart Parking (SP) with Vienna 5G SL simulator. The urban and rural scenarios represent public networks.

After the simulations with Radio Mobile, the respective coverage percentages of 96.43%, 99.92%, 89.78% and 98.43% were obtained. In the public network scenarios, the coverage requirements (95%) are met, but HST and SSL are below the minimum of 95% and 99%. After some optimizations, it was possible to measure a coverage of 98.33% and 99.55%. In the SP scenario, the received signal strength of each sensor was measured in the frequencies 28 GHz and 3.5 GHz. In the 3.5 GHz, all sensors meet the requirements, but in 28 GHz, when there is no line of sight, even with the increment of the transmit power, 59.3% of the sensors do not have enough signal strength. In this scenario, other performance indicators were analysed, such as throughput, Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR) and Channel Quality Indicator (CQI).

Keywords: 5G; Propagation Model; Planning; Private Networks; Simulator.

Índice

AGRADECIMENTOS.....	V
DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
ÍNDICE	XIII
LISTA DE FIGURAS	XV
LISTA DE TABELAS	XIX
LISTA DE ACRÓNIMOS	XXI
LISTA DE SÍMBOLOS	XXV
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	2
CAPÍTULO 2 - ESTADO DE ARTE	5
2.1. 5G NEW RADIO.....	5
2.1.1 <i>Características diferenciadoras das redes 5G.....</i>	<i>6</i>
2.1.2 <i>Arquitetura das redes 5G.....</i>	<i>7</i>
2.1.3 <i>Camada física 5G.....</i>	<i>8</i>
2.1.4 <i>Opções de implementação das redes 5G.....</i>	<i>13</i>
2.2 MODELOS DE PROPAGAÇÃO.....	14
2.2.1 <i>Modelos de propagação 3GPP</i>	<i>14</i>
2.2.2 <i>Modelo de propagação Winner II.....</i>	<i>18</i>
2.2.3 <i>Atenuações adicionais provenientes das mmWaves.....</i>	<i>19</i>
2.3 REDES PRIVADAS	22
2.3.1 <i>Modos de implementação das redes privadas 5G.....</i>	<i>23</i>
2.3.2 <i>Tipos de espetro</i>	<i>24</i>
2.3.3 <i>Casos de utilização e indicadores de desempenho</i>	<i>26</i>
2.4 AMBIENTES DE SIMULAÇÃO	29
2.4.1 <i>Técnicas de validação de sistemas</i>	<i>30</i>
2.4.2 <i>Radio Mobile - RF propagation simulation software.....</i>	<i>32</i>
2.4.3 <i>Vienna 5G System Level Simulator</i>	<i>34</i>
2.4.4 <i>Comparação dos ambientes de simulação.....</i>	<i>35</i>
CAPÍTULO 3 - DIMENSIONAMENTO E PLANEAMENTO INICIAL DA REDE	37
3.1 MODELO DE ANTENA	37

3.1.1 Radio Mobile	37
3.1.2 Vienna 5G	39
3.2 LINK BUDGET.....	40
3.3 DIMENSIONAMENTO E PLANEAMENTO DOS CENÁRIOS	42
3.3.1 Cenário Urbano	43
3.3.2 Cenário Rural.....	48
3.3.3 High Speed Train.....	52
3.3.4 Smart Street Lighting.....	56
3.3.5 Smart Parking.....	61
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DA REDE	65
4.1 CENÁRIO URBANO	66
4.2 CENÁRIO RURAL	70
4.3 CENÁRIO HST	76
4.4 CENÁRIO SSL.....	79
4.5 CENÁRIO SP	83
4.5.1 Faixa dos 28 GHz	84
4.5.2 Faixa dos 3.5 GHz	87
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	97
5.1 TRABALHO FUTURO	98
REFERÊNCIAS.....	99

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Arquitetura geral do NG-RAN, fonte: [10].	8
Figura 2.2 - Representação esquemática do <i>stack</i> de protocolos 5G, fonte: [7].	8
Figura 2.3 - Espectro de frequências do 5G.	10
Figura 2.4 - Estrutura da trama 5G NR em função do espaçamento das subportadoras, retirado de [13].	12
Figura 2.5 - Opções de implementação da rede 5G, fonte: [7].	13
Figura 2.6 – Definições das distâncias para terminais móveis em <i>outdoor</i> , fonte: [15].	15
Figura 2.7 - Implementação de redes privadas em modo: a) Standalone; b) com RAN partilhado; c) com RAN e plano de controlo partilhado e d) hospedado pela rede pública. Adaptado de [24].	24
Figura 2.8 - Bandas de espectro utilizadas em redes móveis privadas e respetivo número de empresas [1].	25
Figura 2.9 - Relação custo benefício dos métodos de validação de sistemas, baseado em [32].	30
Figura 2.10 - Estrutura interna do ficheiro de análise de cobertura criado, retirado de [37].	33
Figura 2.11 – Exemplo de conteúdo de um ficheiro de análise de cobertura criado, retirado de [37].	33
Figura 3.1 - Diagramas de radiação horizontal da antena AAU5613 na frequência dos 3.5 GHz com um ângulo de azimute de: a) 60°; b) 180°; c) 300°.	39
Figura 3.2 - Diagramas de radiação vertical da antena AAU5613 na frequência dos 3.5 GHz com um ângulo de azimute de: a) 60°; b) 180°; c) 300°.	39
Figura 3.3 - Zona de planeamento urbana.	43
Figura 3.4 - Dimensionamento da grelha e pontos centrais das estações base urbanas.	46
Figura 3.5 - Exemplo da colocação de uma estação base no topo de um edifício em Lisboa com perspetiva visual dos edifícios em: a) 3D e b) 2D.	46
Figura 3.6 - Exemplo da colocação de uma estação base na forma de torre em Lisboa.	47
Figura 3.7 - Dimensionamento da grelha e posicionamento das estações base urbanas.	47
Figura 3.8 - Zona de planeamento rural.	48
Figura 3.9 - Dimensionamento da grelha e pontos centrais das estações base rurais.	50
Figura 3.10 - Exemplo de posicionamento de estações para cobertura apenas na IP8.	51
Figura 3.11 - Exemplo de posicionamento de estações numa das zonas habitacionais no cenário rural.	51
Figura 3.12 - Dimensionamento da grelha e posicionamento das estações base rurais.	51
Figura 3.13 - Trajeto do cenário HST.	52

Figura 3.14 - Planeamento faseado da linha de alta velocidade entre Porto e Lisboa, retirado de [51].	52
Figura 3.15 - Representação esquemática da arquitetura <i>one-hop</i> da rede HST, retirado de [53].	53
Figura 3.16 - Posicionamento das estações base HST.	55
Figura 3.17 - Zona de planeamento SSL.	56
Figura 3.18 - Posicionamento dos candeeiros na zona de planeamento em Lisboa, retirado de [58].	57
Figura 3.19 - Dimensionamento da grelha e pontos centrais das estações base SSL.	60
Figura 3.20 - Dimensionamento da grelha e posicionamento das estações base SSL.	60
Figura 3.21 - Zona de planeamento SP.	61
Figura 3.22 - Posicionamento da estação base e sensores SP no <i>Vienna 5G SL Simulator</i> .	64
Figura 4.1 - Posicionamento das estações base urbanas no <i>Radio Mobile</i> .	66
Figura 4.2 - Simulação de cobertura para o cenário urbano inicial.	66
Figura 4.3 - Localização das BTS 51, 52 e 53 no cenário urbano.	67
Figura 4.4 - Simulação de cobertura para o cenário urbano otimizado.	67
Figura 4.5 - <i>Cropping</i> da simulação de cobertura urbana: a) inicial; b) otimizada.	68
Figura 4.6 - CDF do RSRP para o cenário urbano: a) inicial; b) otimizado.	68
Figura 4.7 - Histograma do RSRP para o cenário urbano: a) inicial; b) otimizado.	69
Figura 4.8 - Posicionamento das estações base rurais no <i>Radio Mobile</i> .	70
Figura 4.9 - Simulação de cobertura para o cenário rural inicial.	71
Figura 4.10 - Simulação de cobertura para o cenário rural otimizado.	71
Figura 4.11 - <i>Cropping</i> da simulação de cobertura rural na IP8: a) inicial; b) otimizada.	72
Figura 4.12 - <i>Cropping</i> da simulação de cobertura rural no município de Ferreira do Alentejo: a) inicial; b) otimizada.	72
Figura 4.13 - <i>Cropping</i> da simulação de cobertura rural de Beja: a) inicial; b) otimizada.	72
Figura 4.14 - <i>Cropping</i> da simulação de cobertura rural de Beringel: a) inicial; b) otimizada.	73
Figura 4.15 - CDF do RSRP para o cenário rural na IP8: a) inicial; b) otimizado.	73
Figura 4.16 - CDF do RSRP para o cenário rural no município de Ferreira do Alentejo: a) inicial; b) otimizado.	73
Figura 4.17 - CDF do RSRP para o cenário rural de Beja: a) inicial; b) otimizado.	74
Figura 4.18 - CDF do RSRP para o cenário rural de Beringel: a) inicial; b) otimizado.	74
Figura 4.19 - Histograma do RSRP para o cenário rural na IP8: a) inicial; b) otimizado.	75
Figura 4.20 - Histograma do RSRP para o cenário rural no município de Ferreira do Alentejo: a) inicial; b) otimizado.	75

Figura 4.21 - Histograma do RSRP para o cenário rural de Beja: a) inicial; b) otimizado.....	75
Figura 4.22 - Histograma do RSRP para o cenário rural de Beringel: a) inicial; b) otimizado.	76
Figura 4.23 - Posicionamento das estações base HST no <i>Radio Mobile</i>	77
Figura 4.24 - Simulação de cobertura para o cenário HST inicial.	77
Figura 4.25 - Simulação de cobertura para o cenário HST otimizado.	78
Figura 4.26 - CDF do RSRP para o cenário HST: a) inicial; b) otimizado.	78
Figura 4.27 - Histograma do RSRP para o cenário HST: a) inicial; b) otimizado.....	79
Figura 4.28 - Posicionamento das estações base SSL no <i>Radio Mobile</i>	80
Figura 4.29 - Simulação de cobertura para o cenário SSL inicial.....	80
Figura 4.30 - Realocação da BTS_4 no cenário SSL.	81
Figura 4.31 - Simulação de cobertura para o cenário SSL otimizado.	81
Figura 4.32 - <i>Cropping</i> da simulação de cobertura SSL: a) inicial; b) otimizada.	82
Figura 4.33 - CDF do RSRP para o cenário SSL: a) inicial; b) otimizado.....	82
Figura 4.34 - Histograma do RSRP para o cenário SSL: a) inicial; b) otimizado.	83
Figura 4.35 – <i>Heatmap</i> do RSRP para o cenário SP 28 GHz: a) LOS; b) NLOS.	84
Figura 4.36 - Histograma do RSRP para o cenário SP 28 GHz: a) LOS; b) NLOS.	84
Figura 4.37 – Cumprimento do <i>Threshold</i> de RSRP mínimo de -91.82 dBm para o cenário SP 28 GHz: a) LOS; b) NLOS.	85
Figura 4.38 – Cumprimento do <i>Threshold</i> de RSRP mínimo de -91.82 dBm para o cenário SP 28 GHz NLOS com potência de transmissão de: a) 46 dBm; b) 53 dBm; c) 55 dBm.	86
Figura 4.39 – <i>Heatmap</i> do RSRP para o cenário SP 3.5 GHz: a) LOS; b) NLOS.	87
Figura 4.40 - Histograma do RSRP para o cenário SP 3.5 GHz: a) LOS; b) NLOS.	87
Figura 4.41 – Cumprimento do <i>Threshold</i> de RSRP mínimo de -101.87 dBm para o cenário SP 3.5 GHz: a) LOS; b) NLOS.	88
Figura 4.42 – <i>Heatmap</i> do RSRP para o cenário SP 3.5 GHz e potência de transmissão de 46 dBm: a) LOS; b) NLOS.....	88
Figura 4.43 - Histograma do RSRP para o cenário SP 3.5 GHz e potência de transmissão de 46 dBm: a) LOS; b) NLOS.	89
Figura 4.44 – <i>Heatmap</i> do <i>Throughput</i> para o cenário SP 3.5 GHz: a) LOS; b) NLOS.	90
Figura 4.45 - Histograma do <i>Throughput</i> para o cenário SP 3.5 GHz: a) LOS; b) NLOS.	90
Figura 4.46 – <i>Heatmap</i> do SINR para o cenário SP 3.5 GHz: a) LOS; b) NLOS.....	91
Figura 4.47 - Histograma do SINR para o cenário SP 3.5 GHz: a) LOS; b) NLOS.....	92
Figura 4.48 – <i>Heatmap</i> do CQI para o cenário SP 3.5 GHz: a) LOS; b) NLOS.....	93
Figura 4.49 – <i>Heatmap</i> do RSRP para o cenário SP 3.5 GHz a 40 MHz de largura de banda: a) LOS; b) NLOS.	94

Figura 4.50 – <i>Heatmap</i> do <i>Throughput</i> para o cenário SP 3.5 GHz a 40 MHz de largura de banda: a) LOS; b) NLOS.	94
Figura 4.51 - Histograma do <i>Throughput</i> para o cenário SP 3.5 GHz a 40 MHz de largura de banda: a) LOS; b) NLOS.	95
Figura 4.52 – <i>Heatmap</i> do SINR para o cenário SP 3.5 GHz a 40 MHz de largura de banda: a) LOS; b) NLOS.	95
Figura 4.53 – <i>Heatmap</i> do CQI para o cenário SP 3.5 GHz a 40 MHz de largura de banda: a) LOS; b) NLOS.	95

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Configuração OFDM para 5G NR, adaptado de [13].	11
Tabela 2.2 - Requisitos de desempenho de casos de utilização de redes ferroviárias, baseado em [28].	27
Tabela 2.3 - Requisitos de desempenho do caso de utilização de luzes inteligentes, baseado em [30].	28
Tabela 2.4 - Requisitos de desempenho do caso de utilização de estacionamento inteligente, baseado em [31].	29
Tabela 2.5 - Vantagens e desvantagens dos ambientes de simulação, baseada em [35], [36] e [38].	35
Tabela 3.1 - Parâmetros da antena AAU5613.	38
Tabela 3.2 - Parâmetros da antena utilizada no simulador <i>Vienna 5G</i> .	40
Tabela 3.3 - Parâmetros assumidos para o cenário urbano.	44
Tabela 3.4 - Resultados do <i>link budget</i> para o cenário urbano.	45
Tabela 3.5 - Parâmetros assumidos para o cenário rural.	48
Tabela 3.6 - Resultados do <i>link budget</i> para o cenário rural.	49
Tabela 3.7 - Parâmetros assumidos para o cenário HST.	53
Tabela 3.8 - Resultados do <i>link budget</i> para o cenário HST.	55
Tabela 3.9 - Parâmetros assumidos para o cenário SSL.	58
Tabela 3.10 - Resultados do <i>link budget</i> para o cenário SSL.	59
Tabela 3.11 - Parâmetros assumidos para o cenário SP.	62
Tabela 3.12 - Resultados do <i>link budget</i> para o cenário SP.	63
Tabela 4.1 - Percentagem de cobertura <i>indoor</i> da simulação do cenário urbano inicial e otimizado.	69
Tabela 4.2 - Percentagem de cobertura <i>outdoor</i> da simulação do cenário urbano inicial e otimizado.	69
Tabela 4.3 - Valores de estatística descritiva para o cenário urbano.	70
Tabela 4.4 - Percentagem de cobertura da simulação do cenário rural inicial e otimizado.	74
Tabela 4.5 - Valores de estatística descritiva para o cenário rural.	76
Tabela 4.6 - Percentagem de cobertura da simulação do cenário HST inicial e otimizado.	78
Tabela 4.7 - Valores de estatística descritiva para o cenário HST.	79
Tabela 4.8 - Percentagem de cobertura da simulação do cenário SSL inicial e otimizado.	82
Tabela 4.9 - Valores de estatística descritiva para o cenário SSL.	83
Tabela 4.10 - Percentis do RSRP para o cenário SP 28 GHz.	85
Tabela 4.11 - Número e percentagem de utilizadores que não cumprem o requisito de RSRP mínimo de -91.82 dBm para o cenário SP 28 GHz NLOS.	86

Tabela 4.12 - Percentis do RSRP para o cenário SP 3.5 GHz.....	89
Tabela 4.13 - Percentis do <i>Throughput</i> para o cenário SP 3.5 GHz.	91
Tabela 4.14 - Percentis do SINR para o cenário SP 3.5 GHz.	92
Tabela 4.15 - Percentis do RSRP, <i>Throughput</i> e SINR para o cenário SP 3.5 GHz a 40 MHz de largura de banda.	96

Lista de Acrónimos

2G	Segunda Geração
3G	Terceira Geração
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	Quarta Geração
5G	Quinta Geração
5GC	<i>5G Core</i>
5QI	<i>5G QoS Identifier</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BLER	<i>Block Error Ratio</i>
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i>
CPE	<i>Common Phase Error</i>
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i>
eNB	<i>Evolved NodeB</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
FBR	<i>Front-to-Back Ratio</i>
FR1	<i>Frequency Range 1</i>
FR2	<i>Frequency Range 2</i>
FRMCS	<i>Future Rail Mobile Communications System</i>
gNB	<i>Next Generation NodeB</i>
gNB-CU	<i>gNB Central Unit</i>
gNB-DU	<i>gNB Distributed Units</i>
GSA	<i>Global Mobile Suppliers</i>
HPBW	<i>Half-Power Beamwidth</i>
HST	<i>High Speed Train</i>
ICI	<i>Intercarrier Interference</i>
ISD	<i>Inter-site Distance</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ITM	<i>Irregular Terrain Model</i>
KML	<i>Keyhole Markup Language</i>
KPIs	<i>Key Performance Indicators</i>
LDPC	<i>Low Dense Parity Check</i>
LL	<i>Link Level</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>

MAC	<i>Medium Access Control</i>
MEC	<i>Multi-access Edge Computing</i>
MCS	<i>Modulation Coding Scheme</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
mMIMO	<i>Massive Multiple Input Multiple Output</i>
mMTC	<i>Massive Machine-Type Communications</i>
ng-eNB	<i>Next Generation - Evolved NodeB</i>
NG-RAN	<i>Next Generation Radio Access Network</i>
NLOS	<i>Non Line of Sight</i>
NR	<i>New Radio</i>
NPN	<i>Non-Public Network</i>
NSA	<i>Non-Standalone</i>
O2I	<i>Outdoor-to-Indoor</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OSM	<i>OpenStreetMaps</i>
PDCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
PDU	<i>Protocol Data Unit</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PRB	<i>Physical Resource Blocks</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>
RAT	<i>Radio Access Technology</i>
RMa	<i>Rural Macro</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RSRP	<i>Reference Signal Received Power</i>
SA	<i>Standalone</i>
SCS	<i>Subcarrier Spacing</i>
SDAP	<i>Service Data Adaptation Protocol</i>
SINR	<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i>
SIRESP	<i>Sistema Integrado das Redes de Emergência e Segurança de Portugal</i>
SL	<i>System Level</i>
SLL	<i>Side-Lobe Level</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SP	<i>Smart Parking</i>

SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SSL	<i>Smart Street Lighting</i>
TDD	<i>Time Division Duplexing</i>
TTI	<i>Transmission Time Interval</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UMa	<i>Urban Macro</i>
UMi	<i>Urban Micro</i>
URLLC	<i>Ultrareliable and Low Latency</i>
VR	<i>Virtual Reality</i>

Lista de Símbolos

Δf	Espaçamento entre subportadoras
σ_{SF}	Desvio padrão do <i>shadow fading</i> em dB
α_H	Coeficiente α para determinar a atenuação da chuva, em polarização horizontal
α_V	Coeficiente α para determinar a atenuação da chuva, em polarização vertical
A_a	Margem de atenuação total proveniente dos gases atmosféricos
$A_r^{(p)}$	Atenuação devida à chuva não excedida mais do que p % do tempo
A_{Tx}	Perdas de atenuação dos cabos de instalação
BW	Largura de banda
C	<i>Throughput</i>
c	Velocidade da luz no vácuo
d'_{BP}	Distância do ponto de interrupção (<i>breakpoint</i>)
d_{2D}	Distância a 2 dimensões, 2D, entre a estação base e o móvel
d_{3D}	Distância a 3 dimensões, 3D, entre a estação base e o móvel
d_{BP}	Distância do ponto de interrupção (<i>breakpoint</i>)
d_{ef}	Comprimento eficaz do percurso
e	Pressão parcial do vapor de água
e_s	Pressão parcial do vapor de água saturado à mesma pressão e temperatura
f_c	Frequência central
G_{BS}	Ganho da antena da estação base
G_{UE}	Ganho da antena do terminal móvel
h	Altura média dos edifícios
H	Humidade relativa
h'_{BS}	Altura efetiva da estação base
h'_{UE}	Altura efetiva do terminal móvel
h_{BS}	Altura da estação base
h_E	Altura efetiva do ambiente
h_{UE}	Altura do terminal móvel
k_H	Coeficiente k para determinar a atenuação da chuva, em polarização horizontal
k_V	Coeficiente k para determinar a atenuação da chuva, em polarização vertical

M_F	Margem de <i>Shadow Fading</i>
$N_{PRB}^{BW,u}$	Número de PRB em função da largura de banda e espaçamento de subportadoras escolhidas
N_F	Figura de ruído
p	Concentração de vapor de água
P_{RS}	Potência de transmissão do sinal de referência
$P_{R_x,Sens}$	Sensibilidade do recetor
$P_{T_x,Max}$	Potência máxima de transmissão da estação base
PL	<i>Pathloss</i>
$R_{0.01}$	Intensidade de precipitação excedida em 0.01% do tempo
r_p	Pressão relativa à atmosfera padrão
r_t	Temperatura relativa à atmosfera padrão
T	Temperatura
W	Largura média das ruas em metros;
y_{o0}	Coefficiente de atenuação de atenuação do oxigénio
y_r	Coefficiente de atenuação por unidade de comprimento
y_{w0}	Coefficiente de atenuação de atenuação do vapor de água

Capítulo 1 - Introdução

Neste capítulo é descrita a motivação por detrás do desenvolvimento desta dissertação, bem como os objetivos e a forma como este documento está estruturado.

1.1 Motivação

As redes privadas, de forma resumida são redes de telecomunicações que não são de acesso público, mas sim controladas por uma entidade privada que tipicamente detém controlo total sobre essa rede. Um exemplo de uma rede privada pertencente ao governo de Portugal é o Sistema Integrado das Redes de Emergência e Segurança de Portugal (SIRESP) dedicada ao comando, controlo e coordenação de comunicações em todas as situações de emergência e segurança. Este tipo de redes não é um conceito recente, sendo que este mercado já existe há mais de 20 anos. Inicialmente estas redes eram dimensionadas para as tecnologias de segunda (2G), terceira (3G) e quarta (4G) geração, em números reduzidos, tendo sido usadas tipicamente em infraestruturas de mineração, extração de óleo e gás, aplicações de contexto militar e outras aplicações onde o alcance de cobertura de uma rede pública possa não ser suficiente. As redes de telecomunicações associadas a projetos de ferrovia também utilizavam uma variante da tecnologia 2G designada por GSM-R e eventualmente o seu sucessor, Future Rail Mobile Communications System (FRMCS), que permite a digitalização da rede e suporte a comunicações de maior débito. No entanto estas redes, tal como as aplicações anteriormente mencionadas eram raras devido ao custo elevado de implementação. Atualmente com a introdução de indústrias verticais mais desafiantes e da *internet* das coisas (IoT), tem surgindo um maior interesse na implementação de redes privadas.

De acordo com [1] houve um aumento de 106% na taxa de crescimento anual de novos proprietários de redes privadas entre 2016 e 2021 e em 2022 de todas as redes privadas anunciadas neste estudo 57% eram *Long Term Evolution* (LTE), 23% eram 5G e 18% eram 5G partilhado com LTE. Apesar da maioria dessas redes ser implementada em 4G, com o crescimento da exigência dos requisitos de desempenho tais como baixa latência, elevada segurança e densidade de utilizadores, que as redes privadas 4G não conseguem satisfazer, surge um maior interesse na implementação de redes privadas recorrendo à tecnologia 5G.

Uma das dificuldades que surge na implementação deste tipo de redes é a variedade de requisitos que se deve ter em conta, já que para além dos requisitos integrados na própria tecnologia 5G, surgem também os requisitos do próprio caso de utilização propostos pelo proprietário dessas redes.

Alguns dos trabalhos relacionados com análise de desempenho de redes 5G podem ser encontrados em: [2], [3], [4]. Em [2] é feita uma avaliação de cobertura 5G através modelos de propagação e modelos de antena, e é medida a precisão da estimativa da atenuação de propagação em determinados cenários e configurações de antena *beamforming*, e por fim é medida a precisão de cálculo de modelos de propagação atuais. Em [3] é feito um estudo do desempenho de diferentes métricas de desempenho, como o *throughput* e SINR em função da distância, numa gama variável de frequências, recorrendo a diferentes modelos de propagação compatíveis com o 5G. Em [4] é feita uma análise de desempenho de redes privadas em 5G, utilizando *Network Slicing*, e é desenvolvido e adaptado um modelo de simulação de taxas de dados e latência em 5G.

1.2 Objetivos

Tem-se como objetivo realizar o estudo, dimensionamento, planeamento e simulação do desempenho de redes privadas. Para que se atinja este objetivo deve-se primeiro estudar os conceitos teóricos relacionados com a tecnologia base e de redes privadas desenvolvidas a partir destas, bem como de ambientes de simulação que existem atualmente. Depois de ter uma noção destes conceitos, é possível passar ao dimensionamento que envolve a escolha do local adequado para cada cenário bem como a escolha dos parâmetros mais adequados a utilizar nos cálculos de *link budget*, de forma a determinar o *pathloss* e a partir deste, a distância inter-site, (inter site distance ISD). A partir do ISD, pretende-se criar uma grelha hexagonal, que será usada como referência no posicionamento dos equipamentos nas respetivas áreas escolhidas para cada cenário. Tendo todas as estações base posicionadas serão realizadas simulações com as ferramentas *Radio Mobile - RF propagation simulation software* e o *Vienna 5G SL simulador*, para análise de cobertura e de outras métricas de desempenho como o *throughput*, SINR e CQI, na forma de *heatmaps*, gráficos e histogramas.

1.3 Organização do documento

Esta dissertação encontra-se separada em 5 capítulos:

- **Capítulo 1** – Este é o capítulo onde é introduzido o contexto do trabalho realizado bem como as motivações e objetivos da dissertação;
- **Capítulo 2** – Aqui são descritos alguns dos conceitos fundamentais por detrás das redes 5G, modelos de propagação utilizados com esta tecnologia nas fases de dimensionamento da rede, redes privadas e ambientes de simulação;
- **Capítulo 3** – Neste capítulo inicia-se o dimensionamento inicial de cinco cenários de redes privadas onde são realizados os respetivos cálculos de *link budget*.

Tendo concluído a etapa do dimensionamento, é descrito o processo de planeamento da rede onde é realizado o posicionamento dos equipamentos;

- **Capítulo 4** – Neste capítulo é realizada a análise dos resultados obtidos nas simulações de cada um dos cenários;
- **Capítulo 5** – No último capítulo é feita uma síntese do trabalho realizado ao longo desta dissertação e são apresentadas algumas conclusões.

Capítulo 2 - Estado de Arte

Neste capítulo serão descritos os conceitos teóricos essenciais a ter em conta nesta dissertação. O capítulo encontra-se organizado em 4 partes fundamentais, sendo estas o “5G New Radio (NR)”, “Modelos de Propagação”, “Redes Privadas” e por fim “Ambientes de Simulação”.

2.1. 5G New Radio

As redes 5G representam a nova etapa no desenvolvimento dos sistemas de telecomunicações, devido ao aumento da exigência dos requisitos de desempenho nas redes de telecomunicações tais como baixa latência, elevada segurança e densidade de utilizadores. Deste modo, as redes de 4G começam a demonstrar limitações na satisfação destes requisitos, surgindo a necessidade de procurar alternativas, sendo a evolução para o 5G uma opção apelativa. Comparadas com as redes 4G, as redes 5G apresentam vantagens tanto no domínio da interface rádio como ao nível do sistema. A interface rádio das redes 5G fornece flexibilidade no espectro, débitos binários na ordem dos Gbps, latência ultrabaixa e uma conectividade massiva. Ao nível da arquitetura do sistema, o 5G permite *slicing* da rede, bem como melhorias ao nível da respetiva segurança.

A tecnologia 5G tem três casos de uso fundamentais [5] designados por:

- **Enhanced Mobile Broadband (eMBB)** – focado em melhorar os serviços de banda larga existentes, tentando atingir ritmos de dados de 10 Gbps em *uplink* e 20 Gbps em *downlink*, garantir uma capacidade mínima de 100 Mbps, suportar maiores níveis de tráfego e reduzir o consumo de energia;
- **Ultrareliable and Low Latency (URLLC)** – pretende garantir a redução da latência no ar para apenas 1 ms, facilitando aplicações com alta mobilidade e uma disponibilidade de 99,9999% no tempo de serviço.
- **Massive Machine-Type Communications (mMTC)** – cujo objetivo principal é aumentar a densidade de dispositivos na rede, suportar um maior alcance da rede e garantir um tempo de vida de bateria maior;

2.1.1 Características diferenciadoras das redes 5G

Nesta secção vão ser listadas algumas das características diferenciadoras do 5G, sendo estas:

- **Ondas milimétricas** – De forma a aumentar os ritmos de transmissão de dados, o 5G deve usar o espectro acima das faixas tipicamente utilizadas no LTE, que vão até aos 3 GHz. As ondas milimétricas encontram-se acima da faixa dos 30 GHz, e nestas há uma elevada disponibilidade de espectro, sendo possível ter bandas de canal individuais na ordem das centenas de MHz. Uma desvantagem destas bandas é o facto de o aumento da frequência implicar um aumento na atenuação do sinal, no entanto esta pode ser combatida com técnicas de *beamforming*. Tendo em conta que a dimensão das antenas reduz com o aumento da frequência, ao usar o espectro milimétrico as antenas vão ter dimensões muito menores, podendo assim aplicar com muito mais facilidade a técnica de *massive Multiple Input Multiple Output* (mMIMO) [6];
- **Nova codificação de canal** – No 5G foram feitas inovações nos métodos de codificação do canal. O método de codificação utilizado pelo LTE é o *turbo coding* que apresenta uma complexidade baixa de codificação e uma complexidade alta na decodificação. Tendo em conta a necessidade de blocos de codificação de grandes dimensões e taxas de codificação até 8/9, o *turbo coding* não consegue satisfazer os requisitos de decodificação. Assim, o 5G introduz o *Low Dense Parity Check* (LDPC) que apresenta mais complexidade na codificação, no entanto uma menor complexidade na decodificação conseguindo satisfazer estes critérios. Para além disso, os codificadores LDPC operam em modo paralelo, ao contrário do *turbo coding* que opera em série, sendo possível dar suporte a aplicações de menor latência [7];
- **Network Slicing** – Esta tecnologia permite aos operadores de redes dividir uma única rede física em diversos segmentos de rede, onde cada segmento representa uma rede ponto a ponto, virtual e independente, cujas funcionalidades são definidas de forma customizada ao serviço, no qual se encontra associado. Esta solução permite aumentar a flexibilidade e dinamismo das redes 5G, uma vez que permite a habilidade de acomodar diversos perfis de clientes e serviços, cada um com requisitos de desempenho independentes entre si, sem a necessidade de criar uma nova rede [8];
- **Massive MIMO** – A tecnologia MIMO baseia-se na comunicação sem fios estabelecida para enviar e receber vários sinais de dados de diferentes antenas simultaneamente no mesmo canal rádio. O 5G introduz o conceito de *massive*

MIMO que envolve a aplicação original numa escala maior, usando um maior número de antenas de transmissão e receção, melhorando assim a cobertura, capacidade da rede e eficiência espectral. Uma desvantagem desta técnica é o facto de o número de antenas a implementar depender muito da área disponível consoante o tamanho das antenas individuais;

- **Conectividade massiva (IoT)** – A conectividade massiva é possível de atingir graças à alteração dos mecanismos de acesso múltiplo. As gerações de redes móveis antigas baseavam-se no acesso múltiplo ortogonal, onde cada *resource block* de tempo/frequência era atribuído exclusivamente a um dos utilizadores ativos de forma a evitar interferência entre os diversos utilizadores. No 5G foram introduzidos métodos de acesso múltiplo não ortogonais, que permitem a partilha do mesmo *resource block* por parte de vários utilizadores, possibilitando o aumento da capacidade do sistema e acomodando uma conectividade massiva através de métodos de acesso assíncronos em *uplink*;
- **Baixa latência** – Uma das inovações do 5G é a redução de latência nas comunicações. Uma das formas de o garantir é através da implementação do mecanismo de *Multi-access Edge Computing* (MEC). O MEC é um servidor/*datacenter* colocado próximo da estação base, onde estão alocadas aplicações que podem ser acedidas diretamente pelas estações sem terem de aceder à *Cloud* no *core* da rede. É de notar que as aplicações armazenadas no MEC tipicamente são aplicações críticas que requerem latências mais baixas.

2.1.2 Arquitetura das redes 5G

A arquitetura das redes 5G tem duas componentes principais, a *Next Generation Radio Access Network* (NG-RAN) e o *5G Core* (5GC). As funções destas componentes lógicas encontram-se sempre separadas das funcionalidades de transporte, ainda que estas se encontrem no mesmo equipamento físico.

O objetivo da interface NG-RAN é fornecer acesso rádio 5G aos utilizadores, que quando combinado com mMIMO, *beamforming* e o suporte de frequências mais elevadas possibilita ter um *throughput* maior. O 5GC pode ser separado em duas partes: funções do plano de utilizador e funções do plano de controlo. Enquanto as funções do plano de utilizador servem para fazer o roteamento e o encaminhamento de dados para os equipamentos dos utilizadores, os protocolos do plano de controlo servem para gerir sessões das funções do plano de utilizador e a conexão entre os utilizadores móveis e a rede, em termos de acesso a serviços, recursos da rede, *handover*, entre outros. [9]

Na Figura 2.1 é possível observar uma representação genérica da arquitetura do 5G NR, composta pelas componentes 5GC e NG-RAN. A NG-RAN é composta por diversos *Next Generation NodeB* (gNB). Dentro do gNB existe uma *gNB Central Unit* (gNB-CU) ligada a um ou mais *gNB Distributed Units* (gNB-DU) através de interfaces F1. De forma a conectar os gNB, é usada a interface Xn que liga os respetivos gNB-CU [10].

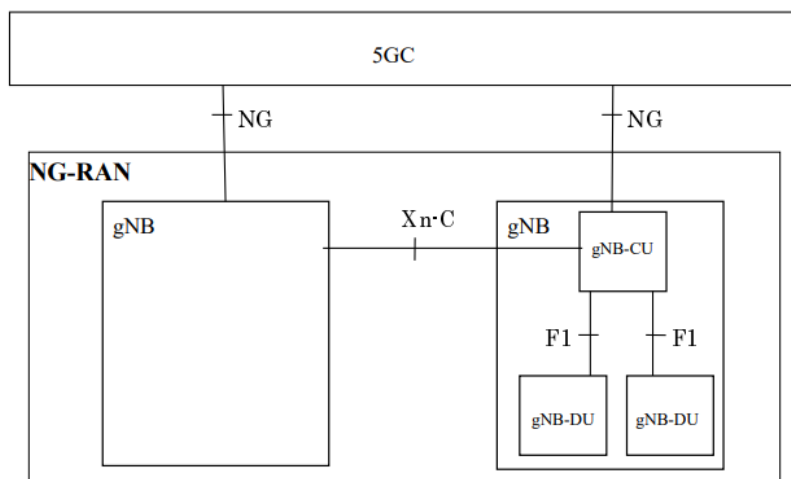


Figura 2.1 - Arquitetura geral do NG-RAN, fonte: [10].

2.1.3 Camada física 5G

As camadas, representadas na Figura 2.2, que fazem parte do protocolo de rede 5G são as camadas física (PHY), controlo de acesso ao meio (MAC), controlo de ligação rádio (RLC), protocolo de conversão de pacotes de dados (PDCP) e o protocolo de adaptação de serviços de dados (SDAP) [8].

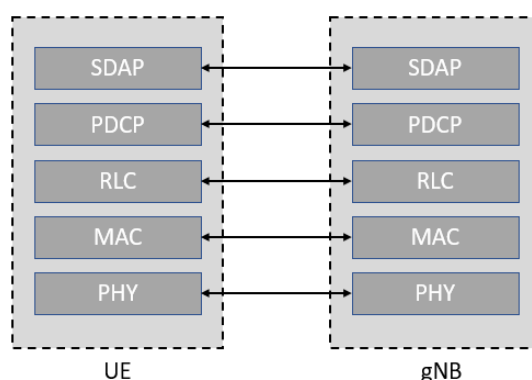


Figura 2.2 - Representação esquemática do *stack* de protocolos 5G, fonte: [7].

A camada mais baixa é a camada PHY, que deve suportar múltiplas opções de implementação de rede, bem como diversas bandas de espectro, mantendo um grau de dinamismo e flexibilidade. Esta camada tem como principal objetivo a conversão de bits de informação em ondas rádio, em quatro etapas fundamentais:

- 1) Proteger a informação recorrendo a métodos de codificação de canal, sendo no caso do 5G, os métodos LDPC (referido na secção 2.1.1) e codificação polar [8];
- 2) Mapear cada um dos símbolos em fluxos paralelos com recurso a um dos seguintes esquemas de modulação e codificação (MCS) suportados pelo 5G: *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK), 16 *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), 64 QAM e 256 QAM [8]. Esta diversidade de opções permite o suporte de uma vasta gama de aplicações sob o 5G. Os esquemas MCS abaixo do 64 QAM são mais robustos, ou seja, menos suscetíveis a perdas e têm uma maior tolerância à interferência, com a desvantagem de um ritmo de transmissão mais baixo. Os MCS acima do 64 QAM têm ritmos de transmissão superiores à custa de uma menor robustez e uma menor tolerância ao ruído. Para além disso, os MCS definem a taxa de codificação, que traduz a razão entre o número de bits de informação útil e o número de bits total, variando entre 1/5 e 1/9 [7]. Quanto maior for este parâmetro, menor é o *overhead*, à custa de uma menor capacidade de deteção e correção de erros, sendo que este deve ser definido em função da qualidade da ligação rádio.
- 3) Aplicar o esquema de multiplexação digital *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), que permite a alocação dinâmica de subportadoras de utilizadores distintos, ou seja, os símbolos previamente mapeados são multiplicados por uma frequência pertencente a outra subportadora igualmente espaçada das restantes de forma a manter a sua ortogonalidade [8];
- 4) Converter sinal digital OFDM num sinal analógico na portadora da frequência desejada [8].

Existem três tipos diferentes de canais rádio na arquitetura 5G, associados com as restantes camadas já descritas [11]:

- **Canais Lógicos** – Estes canais são utilizados pela camada MAC para fornecer serviços à camada RLC. Os protocolos destas duas camadas foram redesenhados para que seja possível processar os dados sem ter conhecimento da quantidade a transmitir de forma a garantir uma latência mais baixa. Os canais lógicos são subdivididos em canais de tráfego e de controlo e tipicamente descrevem o tipo de informação transportada (informação do sistema, de sinalização ou dados) [11];
- **Canais de Transporte** – Estes canais conectam a camada física à camada MAC, descrevendo as características dos dados transportados, como por exemplo, que esquemas de codificação de canal e modulação são usados [11].
- **Canais Físicos** – Os canais físicos podem ser descritos como um conjunto de *resource elements* na grelha de tempo/frequência que transporta informação

para as camadas acima. Um *resource element* é uma subportadora num símbolo OFDM, que tipicamente transporta 1 símbolo modulado. Um *resource block* é um conjunto de *resource elements*. Assim um canal físico pode ser definido por um conjunto de *resource elements* e *resource blocks* [11].

2.1.3.1 Espectro 5G

O 5G foi desenhado para uma gama flexível de frequências dos 450 MHz aos 86 GHz [7], sendo estas distribuídas pelo espectro licenciado, não licenciado e partilhado, que será descrito em mais detalhe na Secção 2.3 dedicada às opções de espectro utilizadas pelas redes privadas 5G.

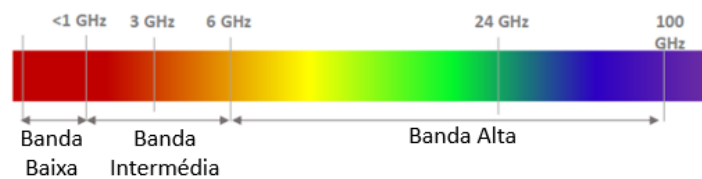


Figura 2.3 - Espectro de frequências do 5G.

Na Figura 2.3 é possível observar três gamas principais de espectro, as bandas baixas inferiores a 1 GHz, as bandas intermédias entre 1GHz e 6GHz e por fim as ondas milimétricas acima dos 6 GHz. As bandas baixas permitem uma maior cobertura, sendo adequadas em cenários de baixa capacidade, uma vez que não suportam elevados ritmos de transmissão, apresentando uma maior disponibilidade de espectro. As bandas intermédias são as faixas mais utilizadas atualmente, representando um compromisso entre cobertura e capacidade e não suportando débitos binários muito acentuados. Por fim as ondas acima dos 6 GHz já descritas inicialmente apresentam uma elevada flexibilidade em termos de dimensão de canais e disponibilidade de espectro, suportando uma elevada capacidade com o custo de uma cobertura mais limitada, devido ao aumento de perdas por propagação.

O 3GPP considera duas regiões de frequência, *Frequency Range 1 (FR1)* e *2 (FR2)*, onde a primeira engloba as bandas baixas e intermédias e a segunda engloba as ondas acima dos 6 GHz [7].

2.1.3.2 Método de transmissão e estrutura da trama

Na subsecção anterior, viu-se que o 5G suporta uma vasta gama de frequências em função do cenário de implementação da rede. De forma a garantir a compatibilidade com essa diversidade de cenários, o 5G NR implementa um sistema de configuração OFDM flexível. Este conceito consiste na adaptação do tempo e frequência de um *resource element*. Assim, é possível ajustar alguns parâmetros tais como o *Subcarrier*

Spacing (SCS), duração da trama/subtrama, intervalo de tempo de transmissão (TTI), duração do prefixo cíclico, entre outros, de forma a suportar uma diversidade de requisitos, tais como latência, cobertura ou ritmo de transmissão e condições de canal em termos de atraso ou efeito de *Doppler* [12].

O espaçamento entre subportadoras, Δf , aprovado pelo 3GPP pode ser definido através da equação (2.1) [13].

$$\Delta f = 15 \times 2^u \quad (2.1)$$

Na equação (2.1), o valor u é um número inteiro que varia de 0 a 4, permitindo assim variar o Δf , entre os 15 kHz e os 240 kHz, com uma variação proporcional à duração do prefixo cíclico [14].

No 5G NR, o número de símbolos OFDM por *slot* é 14, sendo que a duração de uma trama rádio é de 10 ms dividida em 10 subtramas de 1 ms. Cada *resource block* tem 12 subportadoras no domínio da frequência, sendo que uma portadora está limitada a 3300 subportadoras ativas (equivalente a 275 *resource blocks*) resultando nas larguras de banda de 50, 100, 100/200 (FR1/FR2) e 400 MHz, para um espaçamento entre subportadoras de 15, 30, 60 e 120 kHz, respetivamente [14]. Caso se pretenda uma largura de banda superior, pode-se usar o método de agregação de portadoras, onde é possível atingir valores de largura de banda até 6.4GHz, transmitindo até 16 portadoras agregadas em paralelo [14].

Na Tabela 2.1 é possível observar a configuração OFDM utilizada no 5G NR. Tendo em conta que a duração de um *slot* é inversamente proporcional ao espaçamento de subportadoras, quanto maior for esse espaçamento, menor é a duração dos símbolos OFDM, sendo possível suportar aplicações com exigência de menor latência [13].

Tabela 2.1 - Configuração OFDM para 5G NR, adaptado de [13].

Espaçamento entre subportadoras	15 kHz	30 kHz (2x15 kHz)	60 kHz (4x15 kHz)	15×2^u kHz ($u = 3, 4, \dots$)
Duração de símbolo OFDM	66.67 μs	33.33 μs	16.67 μs	$66.67/2^u \mu s$
Duração do prefixo cíclico	4.69 μs	2.34 μs	1.17 μs	$4.69/2^u \mu s$
Símbolo OFDM incluindo CP	71.35 μs	35.68 μs	17.84 μs	$71.35/2^u \mu s$
Nº de símbolos OFDM por <i>slot</i>	14	14	14	14
Duração do <i>slot</i>	1000 μs	500 μs	250 μs	$1000/2^u \mu s$

O ruído de fase em OFDM é uma das fontes de ruído mais comuns, sendo este influenciado pela frequência de oscilação e induzindo a erros de fase comuns (CPE) e

de interferência inter-portadora (ICI). O CPE pode ser corrigido através do processo de correção de canal feito pelas subportadoras piloto. Já a ICI é compensada com a utilização de uma configuração maior, através do incremento do espaçamento entre subportadoras [13].

Nos sistemas OFDM, de forma a prevenir interferência inter-simbólica, é escolhido um prefixo cíclico maior que o espalhamento de atraso no canal, o que implica uma redução na configuração OFDM. Como este espalhamento tende a reduzir com a diminuição do raio de célula, é possível usar uma configuração mais alta (prefixo cíclico menor) em células mais pequenas. Isto coincide com o facto de estas células terem bandas de frequência maiores (sujeitas a piores condições de propagação), fazendo com que um maior espaçamento de subportadoras reduza os efeitos negativos do ruído de fase e ao mesmo tempo garanta o funcionamento de serviços de baixa latência. Também é possível aplicar uma configuração OFDM maior em células com um raio maior para reduzir a latência, no entanto há uma redução de desempenho do sistema em termos de fiabilidade e *throughput* [13].

Na Figura 2.4 é possível observar a estrutura da trama 5G NR em função do espaçamento das subportadoras. Um efeito interessante é que a duplicação do espaçamento conduz à redução do *slot* para metade, ou seja, em função do espaçamento entre subportadoras é possível mapear 2 *slots* no mesmo espaço que antes era ocupado por apenas 1 *slot*. Isto é vantajoso uma vez que facilita a multiplexagem de diferentes configurações na mesma célula para o mesmo *User Equipment* (UE).

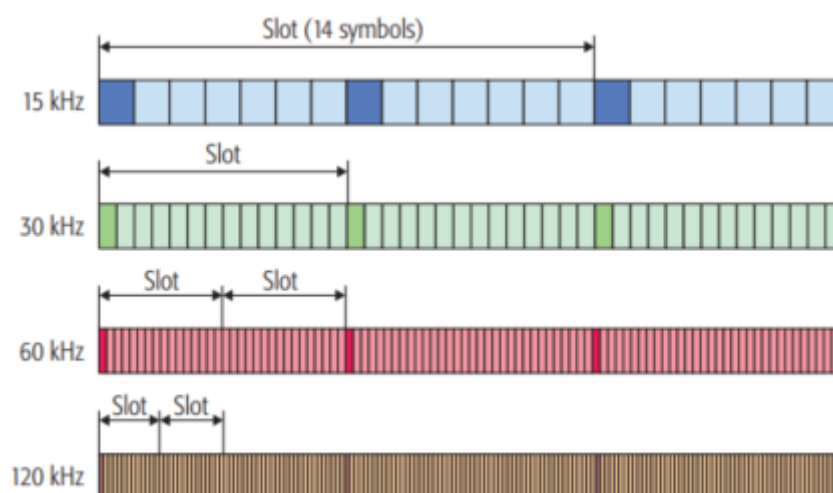


Figura 2.4 - Estrutura da trama 5G NR em função do espaçamento das subportadoras, retirado de [13].

Deve-se ter em conta que o aumento da frequência e da velocidade do utilizador faz com que o sinal recebido se encontre vulnerável aos efeitos *Doppler*, que por sua vez podem causar efeitos de ICI. Para reduzir os efeitos ICI, deve-se utilizar valores de

configuração maiores de forma a acomodar valores de frequência mais altos e cenários com uma elevada mobilidade. Isto é especialmente fundamental nas bandas FR2 (milimétricas), muito mais vulneráveis ao efeito *Doppler*, mesmo em perfis de mobilidade reduzida [12].

Por fim, a escolha da configuração OFDM também deve considerar os requisitos de qualidade de serviço impostos pelo cenário de utilização. Por exemplo, nos serviços que necessitam de uma latência muito baixa, é necessário reduzir a duração dos tempos de símbolo, o que implica aumentar o espaçamento entre portadoras. É de notar que estes requisitos podem fazer conflito com necessidades impostas pelas condições do canal, pelo que a escolha da configuração OFDM deve ser feita de forma que haja um equilíbrio na satisfação dos requisitos em ambas as situações [12].

2.1.4 Opções de implementação das redes 5G

A escrita desta subsecção foi baseada no livro “5G NR Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards” de Ahmadi Sassan [7]. Uma rede 5G pode ser implementada num dos dois modos principais de operação, o modo *Standalone* (SA) e *Non-Standalone* (NSA). Na Figura 2.5 é possível observar 8 opções de implementação, sendo a primeira em modo SA e as restantes em modo NSA.

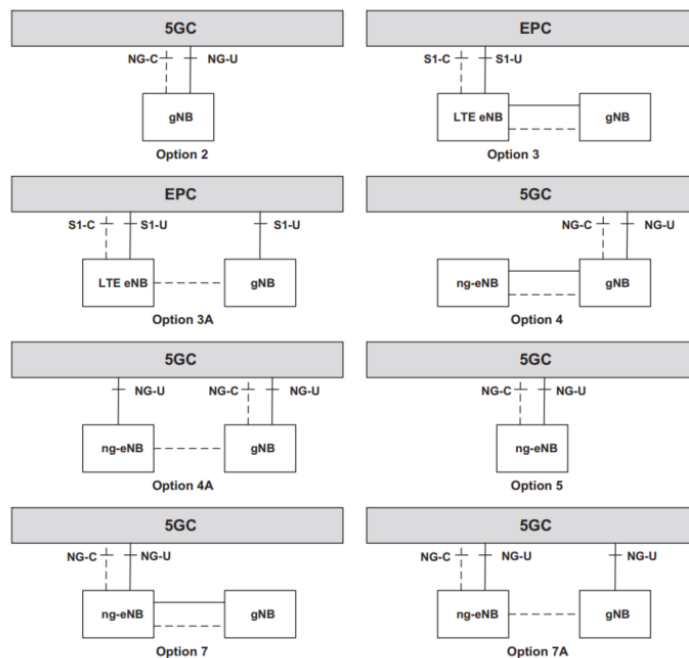


Figura 2.5 - Opções de implementação da rede 5G, fonte: [7].

No modo SA o 5G (opção 2) opera de forma completamente independente do 4G, sendo que o móvel consegue conectar diretamente a um gNB e assim ligar ao 5GC de forma a usufruir dos serviços da rede.

No modo NSA, é usado um mecanismo de conectividade dupla entre o gNB do 5G e o *evolved NodeB* (eNB) do 4G. Este modo é frequentemente utilizado nos estágios iniciais das redes NR, uma vez que estas podem ainda não conseguir cumprir requisitos de cobertura, tirando assim proveito da infraestrutura LTE já implementada, continuando a usufruir do acréscimo de *throughput* de dados e redução de latência por parte do 5G. Neste modo uma desvantagem que existe é o facto de os equipamentos móveis serem mais complexos de forma a poder realizar conexões em 4G e 5G em simultâneo.

Na opção 3, o *evolved packet Core* (EPC) é utilizado como o *Core* da rede, sendo o nó gNB considerado secundário e estando ligado ao nó principal eNB. A informação do plano de controlo é assim trocada entre estes dois nós, encontrando-se apenas o eNB ligado diretamente ao *Core*. Não é assim necessária uma interface ligada ao 5GC. A opção 3A é uma especificação da opção 3, onde o gNB se encontra também ligado ao EPC. Tipicamente a opção 3 é a mais utilizada em etapas do desenvolvimento inicial de uma rede 5G.

A implementação da opção 4 é o oposto da anterior, uma vez que o gNB é o nó principal e o eNB o secundário, sendo neste caso o *Core* utilizado o 5GC. Na opção 4A, o eNB consegue estar ligado também diretamente ao 5GC.

Na opção 5, é utilizado um módulo eNB compatível com a LTE *Release 15* (ng-eNB) ligado diretamente ao 5GC.

Por fim, a opção 7 tem uma topologia semelhante à opção 3, com a exceção de que em vez do EPC é utilizado um 5GC como *Core*. Isto implica que para um nó LTE se ligar a este *Core* com as interfaces NG-C e NG-U terá de se usar um ng-eNB em vez do eNB. A opção 7A é um caso particular da opção 7 que segue a mesma linha de raciocínio definida para a opção 3A.

2.2 Modelos de Propagação

Neste subcapítulo serão descritos os modelos de propagação utilizados no dimensionamento dos cenários de redes 5G a simular. Adicionalmente, é feita uma descrição de margens de atenuação adicionais que se deve ter em conta quando se pretende utilizar frequências na faixa das ondas milimétricas.

2.2.1 Modelos de propagação 3GPP

Aqui são descritos os modelos de propagação utilizados nos cálculos do dimensionamento inicial de uma rede 5G, mais especificamente os modelos desenvolvidos pela organização 3GPP [15] para cenários *Urban Macro* (UMa), *Urban Micro* (UMi) e *Rural Macro* (RMa). Estes modelos foram desenvolvidos para serem compatíveis com frequências desde os 0.5 GHz até aos 100 GHz. É de notar que o

$pathloss$, PL , é em dB, a frequência, f_c , é em GHz, todas as medidas de distância referenciadas nos modelos são em metros e a distribuição de *shadow fading* é log-normal e o seu desvio padrão, σ_{SF} , para cada cenário em dB será indicado nas específicas equações.

Na Figura 2.6 é possível observar a definição das distâncias para os terminais móveis em *outdoor*, onde:

- d_{2D} – Distância a 2 dimensões, 2D, entre a estação base e o móvel em metros;
- d_{3D} – Distância a 3 dimensões, 3D, entre a estação base e o móvel em metros;
- h_{BS} – Altura da estação base em metros;
- h_{UE} – Altura do terminal móvel em metros;

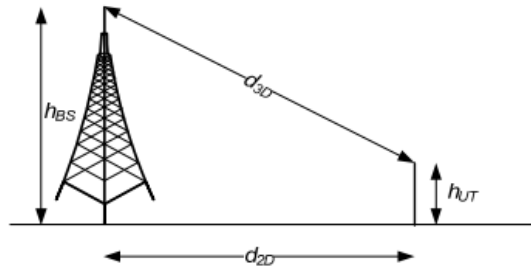


Figura 2.6 – Definições das distâncias para terminais móveis em *outdoor*, fonte: [15].

A distância, d_{3D} , pode ser calculada através da equação (2.2).

$$d_{3D} = \sqrt{d_{2D}^2 + (h_{BS} - h_{UE})^2} \quad (2.2)$$

2.2.1.1 Modelo UMa

O modelo UMa, dedicado a cenários urbanos com macro células, é composto por dois grupos de equações, um para cenários em *Line of Sight*, LOS, e o outro para *Non Line of Sight*, NLOS.

As equações (2.3), (2.4) e (2.5) descrevem o modelo LOS.

$$PL_{UMa_LoS} = \begin{cases} PL_1, 10m \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ PL_2, d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5km \end{cases} \quad (2.3)$$

$$PL_1 = 28 + 22 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c), \sigma_{SF} = 4 \quad (2.4)$$

$$PL_2 = 28 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 9 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UE})^2), \sigma_{SF} = 4 \quad (2.5)$$

Onde os respectivos parâmetros representam:

- d'_{BP} – Distância do ponto de interrupção (*breakpoint*) em metros;
- f_c – Frequência central em GHz;

- σ_{SF} – Desvio padrão do *shadow fading* em dB;

As expressões (2.6) e (2.7) descrevem o modelo NLOS.

$$PL_{UMa_NLoS} = \max(PL_{UMa_LoS}, PL'_{UMa_NLoS}) \quad (2.6)$$

$$PL'_{UMa_NLoS} = 13.54 + 39.08 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 0.6 \log_{10}(h_{UE} - 1.5), \quad (2.7)$$

$$\sigma_{SF} = 6$$

A distância d'_{BP} pode ser determinada com recurso à equação (2.8):

$$d'_{BP} = 4h'_{BS}h'_{UE}f_c \times 10^9/c \quad (2.8)$$

Onde os parâmetros descritos representam:

- c – Velocidade da luz no vázio, 3.0×10^8 m/s;
- h'_{BS} – Altura efetiva da estação base;
- h'_{UE} – Altura efetiva do terminal móvel;

As alturas efetivas da estação base e móvel podem ser determinadas através das equações (2.9) e (2.10) respetivamente.

$$h'_{BS} = h_{BS} - h_E \quad (2.9)$$

$$h'_{UE} = h_{UE} - h_E \quad (2.10)$$

Onde h_E representa a altura efetiva do ambiente. Para UMA, $h_E = 1$ m com probabilidade igual a $\frac{1}{1+C(d_{2D}, h_{UE})}$ e escolhida através de uma distribuição uniforme $(12, 15, \dots, (h_{UE} - 1.5))$. As equações (2.11) e (2.12) permitem calcular $C(d_{2D}, h_{UE})$.

$$C(d_{2D}, h_{UE}) = \begin{cases} 0, & h_{UE} < 13m \\ \left(\frac{h_{UE} - 13}{10}\right)^{1.5} g(d_{2D}), & 13m \leq h_{UE} \leq 23m \end{cases} \quad (2.11)$$

$$g(d_{2D}) = \begin{cases} 0, & d_{2D} < 18m \\ \frac{5}{4} \left(\frac{d_{2D}}{100}\right)^3 \exp\left(\frac{-(d_{2D}/100)}{150}\right), & 18m < \left(\frac{d_{2D}}{100}\right) \end{cases} \quad (2.12)$$

2.2.1.2 Modelo UMi

O modelo UMi, tal como o modelo UMa, é dedicado a cenários urbanos, no entanto com micro células, e é também composto por dois grupos de equações, um para cenários em LOS, e o outro para NLOS.

As equações (2.13), (2.14) e (2.15) descrevem o modelo LOS.

$$PL_{UMi_LoS} = \begin{cases} PL_1, 10m \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ PL_2, d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5km \end{cases} \quad (2.13)$$

$$PL_1 = 32.4 + 21 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c), \sigma_{SF} = 4 \quad (2.14)$$

$$PL_2 = 32.4 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 - 9.5 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UE})^2), \sigma_{SF} = 4 \quad (2.15)$$

As expressões (2.16) e (2.17) descrevem o modelo NLOS.

$$PL_{UMi_NLoS} = \max(PL_{UMi_LoS}, PL'_{UMi_NLoS}) \quad (2.16)$$

$$PL'_{UMi_NLoS} = 22.4 + 35.3 \log_{10}(d_{3D}) + 21.3 \log_{10}(f_c) - 0.3 \log_{10}(h_{UE} - 1.5), \sigma_{SF} = 7.82 \quad (2.17)$$

2.2.1.3 Modelo RMa

O modelo RMa, dedicado a cenários rurais, é composto por dois grupos de equações, um para cenários LOS, e o outro para cenários NLOS.

As equações (2.18), (2.19) e (2.20) descrevem o modelo LOS.

$$PL_{RMa_LoS} = \begin{cases} PL_1, 10m \leq d_{2D} \leq d_{BP} \\ PL_2, d_{BP} \leq d_{2D} \leq 10km \end{cases} \quad (2.18)$$

$$PL_1 = 20 \log_{10} \left(40\pi d_{3D} \frac{f_c}{3} \right) + \min(0.03h^{1.72}, 10) \log_{10}(d_{3D}) \quad (2.19)$$

$$- \min(0.044h^{1.72}, 14.77) + 0.002 \log_{10}(h) d_{3D}, \sigma_{SF} = 4$$

$$PL_2 = PL_1(d_{BP}) + 40 \log_{10} \left(\frac{d_{3D}}{d_{BP}} \right), \sigma_{SF} = 6 \quad (2.20)$$

Onde os respetivos parâmetros representam:

- d_{BP} – Distância do ponto de interrupção (*breakpoint*) em metros;
- h – Altura média dos edifícios em metros;

As expressões (2.21) e (2.22) descrevem o modelo NLOS.

$$PL_{RMa_NLoS} = \max(PL_{RMa_LoS}, PL'_{RMa_NLoS}) \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned}
PL'_{RMA_NLoS} &= 161.04 \\
&- 7.1 \log_{10}(W) + 7.5 \log_{10}(h) - \left(24.37 - 3.7 \left(\frac{h}{h_{BS}}\right)^2\right) \log_{10}(h_{BS}) \\
&+ (43.42 - 3.1 \log_{10}(h_{BS})) (\log_{10}(d_{3D}) - 3) + 20 \log_{10}(f_c) \\
&- (3.2(\log_{10}(11.75h_{UE}))^2 - 4.97), \sigma_{SF} = 8
\end{aligned} \tag{2.22}$$

Onde os parâmetros descritos representam:

- W – Largura média das ruas em metros;

A distância d_{BP} pode ser determinada com recurso à equação (2.23):

$$d_{BP} = 4h_{BS}h_{UE}f_c \times 10^9/c \tag{2.23}$$

2.2.2 Modelo de propagação Winner II

O modelo Winner II [16] é um modelo de propagação desenhado para vários cenários. Neste caso, o cenário específico a ter em conta será o cenário D2a (*Moving Networks*), que é uma variação do cenário D2 (*Rural Moving Networks*), onde os equipamentos móveis se encontram em movimento a velocidades elevadas. Este cenário considera o cenário rural LOS onde o comboio se desloca a velocidades de 350 km/h. Este modelo considera frequências de 2 a 6 GHz.

De forma geral, o *pathloss* pode ser calculado com recurso à expressão (2.24).

$$PL = A \log_{10}(d_{3D}) + B + C \log_{10}\left(\frac{f_c}{5.0}\right) + X \tag{2.24}$$

Onde:

- A – Parâmetro de ajuste;
- B – Parâmetro de interceção;
- C – *Pathloss* dependente da frequência;
- X – Parâmetro específico do ambiente;
- f_c – Frequência central em GHz.

Para as redes móveis o *pathloss* é calculado com recurso à expressão (2.25).

$$\begin{cases}
A = 21.5; B = 44.2; C = 20; X = 0, & 10m < d < d_{BP} \\
PL = 40 \log_{10}(d_{3D}) + 10.5 - 18.5 \log_{10}(h_{BS}) - 18.5 \log_{10}(h_{UE}) + 1.5 \log_{10}\left(\frac{f_c}{5.0}\right), & d_{BP} < d < 10km
\end{cases} \tag{2.25}$$

Onde:

- h_{BS} – Altura efetiva da estação base em metros;
- h_{UE} – Altura efetiva do terminal móvel em metros;

- d_{BP} – Distância do ponto de interrupção (*breakpoint*) em metros;

A distância de *breakpoint* pode ser calculada através da mesma expressão (2.23) utilizada para calcular o mesmo parâmetro no modelo 3GPP RMa.

2.2.3 Atenuações adicionais provenientes das mmWaves

Um fator que se deve ter em conta com frequências elevadas, nomeadamente na faixa das ondas milimétricas é a fácil degradação do sinal face à presença da chuva e outros efeitos atmosféricos. A partir dos 5 GHz [17] essas atenuações começam a ter um impacto suficientemente notável na força do sinal pelo que margens adicionais devem ser contabilizadas no dimensionamento da rede.

Nas duas subsecções seguintes será descrito o processo para determinar as margens de atenuação causada pela precipitação e será apresentada a metodologia referente às margens provenientes dos gases atmosféricos.

2.2.3.1 Atenuação de precipitação

Nesta subsecção é apresentado o método para calcular a margem de atenuação proveniente da chuva baseada no ITU-R P.530-17 [17] e no ITU-R P838-3 [18]. Quando o sinal colide com uma gota de chuva, parte da sua energia é absorvida pela água e a restante é dispersa e estas perdas podem ser significativas uma vez que essa energia pode ser dispersas em direções diferentes da desejada [19].

Primeiro, é necessário calcular o coeficiente de atenuação por unidade de comprimento, γ_r , através da equação (2.26).

$$\gamma_r = kR_{0.01}^\alpha \quad (2.26)$$

Onde $R_{0.01}$ representa a intensidade de precipitação (mm/h) excedida em 0.01% do tempo. Tipicamente em Portugal a intensidade de precipitação é de 42 mm/h. k e α são dependentes da frequência, da temperatura, da forma das gotas e da distribuição estatística das suas dimensões, onde k pode ser k_H ou k_V e α pode ser α_H ou α_V no caso de a polarização ser horizontal ou vertical. As constantes referentes a essas duas polarizações podem ser determinadas por tabelas presentes em [18], em função da frequência escolhida. As constantes k e α para outros tipos de polarização inclinadas em τ , em relação à horizontal, e um ângulo de fogo θ , podem ser determinadas pelas expressões (2.27) e (2.28).

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2\theta\cos(2\tau)] / 2 \quad (2.27)$$

$$\alpha = [k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2\theta\cos(2\tau)] / 2k \quad (2.28)$$

Depois partindo da intensidade de precipitação e o comprimento real da ligação, d , efetua-se o cálculo do comprimento eficaz do percurso, d_{ef} , através da equação (2.29).

$$d_{ef} = \frac{d}{1 + \frac{d}{35 \exp(-0.015 Ri_{0.01})}} \quad (2.29)$$

Por fim calcula-se a atenuação devido à chuva não excedida em mais de 0.01% do tempo, $A_r^{(0.01)}$, através da equação (2.30).

$$A_r^{(0.01)} = y_r d_{ef} \quad (2.30)$$

Adicionalmente, é possível determinar a atenuação devido à chuva não excedida em mais do que $p\%$ do tempo, onde $0.001 < p < 1$ $A_r^{(p)}$, a partir de $A_r^{(0.01)}$ pela equação (2.31).

$$A_r^{(p)} = A_r^{(0.01)} 0.12 p^{-(0.546 + 0.043 \log_{10} p)} \quad (2.31)$$

2.2.3.2 Atenuação atmosférica

Tipicamente, as faixas de frequência mais altas, nomeadamente as ondas milimétricas, estão sujeitas a uma maior absorção do seu sinal por parte da presença dos gases atmosféricos, mais precisamente o oxigénio e o vapor de água.

A margem de atenuação total proveniente dos gases atmosféricos, A_a , em dB, pode ser calculada pela equação (2.32).

$$A_a = (y_{o0} + y_{w0})d \quad (2.32)$$

Onde d é o comprimento da ligação e y_{o0} e y_{w0} representam os coeficientes de atenuação do oxigénio e vapor de água, em dB/km, respetivamente. O cálculo destes coeficientes é baseado na recomendação ITU-R P.676-3 [20].

O coeficiente de atenuação do oxigénio para frequências inferiores a 57 GHz pode ser calculado através da equação (2.33).

$$y_o = \left[\frac{7.27 r_t}{f^2 + 0.351 r_p^2 r_t^2} + \frac{7.5}{(f - 57)^2 + 2.44 r_p^2 r_t^2} \right] f^2 r_p^2 r_t^2 \times 10^{-3} \quad (2.33)$$

Onde f é a frequência em GHz e r_p e r_t representam a pressão e a temperatura relativas à atmosfera padrão, respetivamente.

Estes dois últimos parâmetros podem ser calculados através das equações (2.34) e (2.35).

$$r_p = \frac{p}{1013} \quad (2.34)$$

$$r_t = \frac{288}{273 + T} \quad (2.35)$$

Onde p representa a pressão atmosférica, em hPa, e T a temperatura, em °C.

O coeficiente de atenuação do vapor de água é calculado através da equação (2.36).

$$y_w = \left[3.27 \times 10^{-2} r_t + 1.67 \times 10^{-3} \rho \frac{r_t^7}{r_p} + 7.7 \times 10^{-4} f^{0.5} \right. \quad (2.36)$$

$$+ \frac{3.79}{(f - 22.235)^2 + 9.81 r_p^2 r_t} + \frac{11.73 r_t}{(f - 183.31)^2 + 11.85 r_p^2 r_t}$$

$$\left. + \frac{4.01 r_t}{(f - 325.153)^2 + 10.44 r_p^2 r_t} \right] f^2 \rho r_p r_t \times 10^{-4}$$

Onde ρ é a concentração de vapor de água, em g/m^3 , que pode ser determinado através da equação (2.37) recomendada pela norma ITU-R P.453-6 [21].

$$p = 216.7 \frac{e}{T + 273.3} \quad (2.37)$$

Onde e representa a pressão parcial do vapor de água, em hPa, que pode ser calculado através da equação (2.38).

$$e = \frac{H}{100} e_s \quad (2.38)$$

Onde H representa a humidade relativa, em %, e e_s a pressão parcial do vapor de água saturado à mesma pressão e temperatura, em hPa. Esta última variável é calculada através da equação (2.39) [21].

$$e_s = 6.1121 \exp\left(\frac{17.502T}{240.97 + T}\right) \quad (2.39)$$

2.3 Redes Privadas

As redes privadas não são um conceito recente, de facto, estas têm sido estudadas desde o lançamento das tecnologias 2G/3G. Recentemente, tem surgido um maior foco neste tipo de redes, provocado pela introdução de indústrias verticais mais desafiantes e da IoT. Atualmente, a maioria das redes privadas são implementadas em 4G/LTE principalmente pelo facto de o mercado favorecer mais esse tipo de redes em termos de uma maior disponibilidade de equipamento para 4G quando comparado com 5G [22]. Estas redes são facilmente implementáveis tirando proveito da infraestrutura 4G já instalada, no entanto, com o crescimento da exigência dos requisitos de desempenho, tais como baixa latência, elevada segurança e densidade de utilizadores, que as redes privadas 4G não conseguem satisfazer, surge a necessidade de procurar alternativas, sendo a evolução para o 5G uma opção mais apelativa. Comparado com as redes 4G, as redes 5G apresentam vantagens tanto no domínio da interface rádio como ao nível do sistema. A interface rádio das redes 5G fornece flexibilidade no espectro, débitos binários na ordem dos Gbps, latência ultrabaixa e uma conectividade massiva. Ao nível da arquitetura do sistema, o 5G permite *slicing* da rede o que é mais seguro. Para além disso, como a utilização de redes 5G tem expandido globalmente, tem surgido um aumento de disponibilidade de equipamentos e serviços relacionados com o 5G no mercado, facilitando assim cada vez mais a implementação dessas redes [22].

Uma rede privada 5G, também conhecida como rede privada 3GPP ou *Non-Public Network* (NPN), é uma rede local baseada na tecnologia 5G para uma conexão dedicada sem fios numa determinada região. A parte da *Radio Access Network* (RAN) é constituída por múltiplas estações base, cujo número depende dos requisitos de cobertura e capacidade. Já a parte *Core* é mais simplificada que a da rede pública. Esta rede pode ser uma entidade separada da rede pública ou pode ser implementada junto das estações base da rede principal. Estas redes privadas, ao contrário das redes tradicionais públicas, permitem às empresas correr aplicações e serviços com equipamento e definições dedicadas, sendo possível listar as seguintes vantagens [23]:

- **Cobertura dedicada** – Ter uma cobertura dedicada é importante em situações onde queira implementar uma rede privada numa área cuja cobertura *outdoor* ou *indoor* da rede pública seja fraca ou inexistente;
- **Capacidade exclusiva** – Devido ao facto da rede ser privada, a capacidade é dedicada à rede em si, não havendo risco de saturação de capacidade da mesma forma que existe na rede pública;

- **Controlo total** – Ao contrário das redes públicas, o dono tem controlo completo nas políticas de segurança, gestão de tráfego e contenção de dados sensíveis na infraestrutura;
- **Serviço customizado** – Como a rede é privada e tipicamente dedicada a um conjunto restrito de aplicações ou serviços, a rede é customizada de forma a cumprir esses requisitos específicos da rede.

2.3.1 Modos de implementação das redes privadas 5G

De um ponto de vista funcional, as redes privadas 5G podem ser implementadas de duas maneiras [24]:

- **Modo *Standalone*** – Neste modo a rede privada 5G é implementada como um sistema completamente isolado e independente da rede principal pública. As razões de isso ser possível de implementar são o facto de as redes privadas possuírem um identificador único não associado à rede pública, terem espectro dedicado e serem implementadas com o seu próprio sistema *Core* e RAN. É possível conectar as duas redes via *firewall* para permitir que os dispositivos de redes privadas consigam aceder também à rede pública;
- **Modo integrado com a rede pública** – Ao contrário do modo *Standalone*, este modo partilha parte da infraestrutura física com a rede pública. Esta partilha de infraestrutura pode trazer algumas desvantagens tais como menos opções de customização, controlo e segurança. Este modo pode ser subdividido em 3 categorias [24]:
 - **Modo com RAN partilhado** – Tal como o nome indica, parte da RAN é partilhada por ambas as redes, no entanto, as funções de rede continuam a ser separadas. Para além disso, todo o tráfego da rede privada continua confinado na sua área local;
 - **Modo com RAN e plano de controlo partilhado** – Tal como o modo anterior, parte da RAN é partilhada, com a adição da partilha do plano de controlo da rede, sendo estas funções geridas pela rede pública. Isto é conseguido graças à técnica de *network slicing* que permite separar múltiplas redes em diferentes domínios lógicos sobre a mesma estrutura física. Todo o tráfego da rede privada fica confinado no seu domínio lógico, no entanto, os dispositivos dessa rede conseguem conectar-se diretamente à rede pública e usufruir dos seus serviços;
 - **Modo hospedado pela rede pública** – Neste modo, a rede privada é hospedada na sua totalidade pela rede pública, sendo que neste caso o tráfego da rede privada deixa de estar confinado no seu domínio lógico.

De forma a manter algum isolamento, recorre-se a mecanismos de virtualização em ambientes *Cloud* para garantir uma distinção entre ambos os tipos de tráfego, como sendo provenientes de redes diferentes. Na Figura 2.7 encontra-se uma representação ilustrativa destes modos de implementação de redes privadas, adaptada de [24].

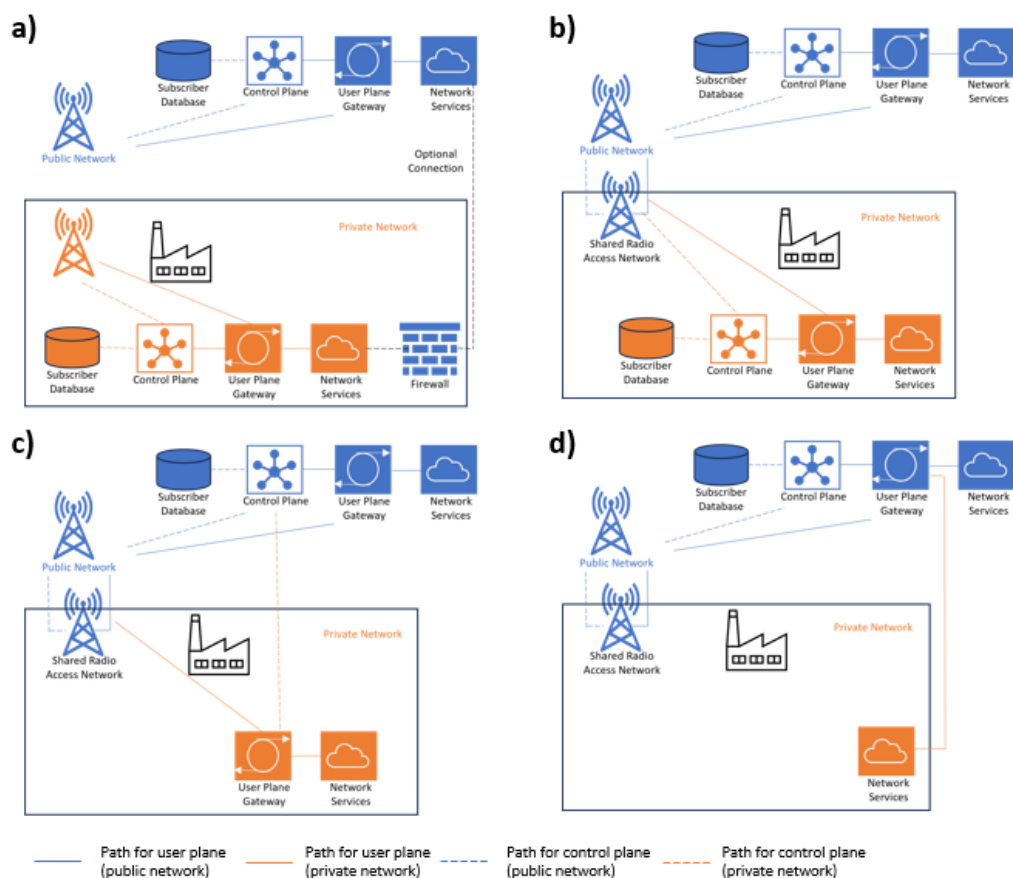


Figura 2.7 - Implementação de redes privadas em modo: a) Standalone; b) com RAN partilhado; c) com RAN e plano de controlo partilhado e d) hospedado pela rede pública. Adaptado de [24].

2.3.2 Tipos de espectro

As redes privadas 5G podem ser implementadas com três tipos diferentes de espectro [23], já mencionados na subsecção 2.1.3.1:

- **Espectro licenciado** – Tal como as redes públicas 5G, as redes privadas podem ser implementadas com recurso a espectro licenciado, tipicamente obtido a partir de uma operadora de redes móveis, ou seja, esta aloca parte das bandas do seu espectro para uso privado. Isto traz vantagens em termos de uma maior garantia de desempenho com um menor risco de interferência;
- **Espectro não licenciado** – Este tipo de espectro é de acesso gratuito, tendo a vantagem de facilitar a implementação rápida de redes privadas. Alguns

exemplos desse espectro são as bandas dos 2.4 GHz, 5 GHz e 6 GHz. Uma desvantagem da utilização destas bandas é o facto de estas estarem sujeitas a interferências ou tentativas maliciosas de *jamming* que podem comprometer o funcionamento das aplicações e serviços;

- **Espetro licenciado partilhado** – Este espectro dedicado é obtido através de entidades reguladoras e não de operadoras de redes móveis em si, sendo esta opção apelativa para redes que não dependam de operadoras móveis públicas. Alguns exemplos disso são a banda do cidadão nos 3.5 GHz nos Estados Unidos, 3.7 aos 3.8 GHz na Alemanha, entre outros. Ao contrário do espectro não licenciado, surgem paradigmas de acesso ao espectro partilhado que permitem reduzir interferência de uma forma semelhante às versões licenciadas.

Num documento criado pela *Global Mobile Suppliers* (GSA) [1], é possível observar as bandas de frequência mais utilizadas em implementações de redes móveis privadas, estando estas representadas no gráfico da Figura 2.8, onde se usou por base 164 organizações.

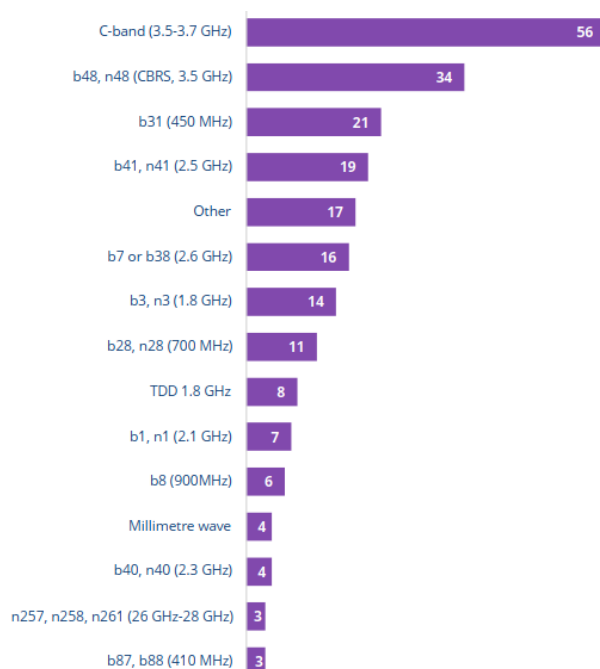


Figura 2.8 - Bandas de espectro utilizadas em redes móveis privadas e respetivo número de empresas [1].

Ao observar estes dados conclui-se que o espectro licenciado partilhado é das opções mais populares atualmente, sendo isto coincidente com o facto de que as entidades reguladoras têm mostrado maior interesse em alocar espectro dedicado para redes privadas, tipicamente em porções e em localizações específicas, tornando-se cada vez mais uma alternativa a considerar em relação a espectro licenciado por operadoras móveis.

2.3.3 Casos de utilização e indicadores de desempenho

Os indicadores de desempenho ou *Key Performance Indicators* (KPIs) são métricas desenhadas para a monitorização e a otimização do desempenho dos sistemas de telecomunicações. As unidades de medição do KPI irão depender da métrica a implementar.

Dependendo da rede a implementar serão definidos KPIs específicos, no entanto encontram-se definidos pelo 3GPP alguns KPIs [25], separados em sete categorias descritas em baixo, sendo que a categoria da disponibilidade será adicionada numa versão futura:

- **Acessibilidade** – A capacidade de um serviço ser obtido, dentro de um nível de tolerância e condições específicas quando um utilizador faz um pedido [26];
- **Integridade** – Grau de disponibilidade de um serviço com um determinado grau de tolerância a falhas pré-definido [26];
- **Utilização** – Métrica que representa a utilização da rede, medindo tipicamente o número de sessões *Protocol Data Unit* (PDU) estabelecidas;
- **Retenção** – Probabilidade de retenção de um serviço que satisfaça um conjunto de condições num dado intervalo de tempo;
- **Mobilidade** – Métrica focada nas taxas de sucesso e tempo de *handover*;
- **Eficiência energética** – Mede o consumo de energia na rede 5G em geral ou em troços específicos como a interface rádio ou determinados *slices*;
- **Fiabilidade** – Representa a disponibilidade de uma rede de comunicação, ou seja, a percentagem de pacotes de rede enviados com sucesso para o destino num intervalo de tempo específico [27];

De seguida é feito um estudo de alguns casos de utilização de redes privadas, indicando os seus respetivos requisitos. Os casos estudados foram as redes ferroviárias, luzes inteligentes e estacionamento inteligente.

2.3.3.1 Redes ferroviárias

A utilização de redes de transporte ferroviário têm ganho uma maior popularidade globalmente, nomeadamente nos continentes da Europa e Ásia. Deve-se ter em conta que a implementação de uma rede ferroviária também envolve a implementação de uma rede de comunicação associada que cumpra alguns requisitos, tais como, alta capacidade, fiabilidade, serviços de comunicação críticos para as carruagens e que suporte funcionalidades de controlo, vigilância e manutenção. Para além disso, também surge a necessidade de desenvolver redes de comunicação entre equipamentos da ferrovia e redes de alta capacidade para comunicação dos passageiros [28].

Uma das formas de implementar esses sistemas consiste na separação de redes dedicadas a comunicações críticas e não críticas. As redes de comunicação crítica são compostas por serviços relacionados com a segurança e a fiabilidade das redes ferroviárias. Estas podem ser separadas em duas categorias: comunicações *Train-to-Ground* responsáveis pelos sistemas de sinalização dedicados à operação do comboio e o seu controlo, onde é transmitida principalmente a posição das locomotivas de forma a controlar o seu movimento e velocidade para evitar acidentes em caso de haver falhas na comunicação; a outra consiste na rede de comunicação ferroviária responsável pela conectividade entre todos os equipamentos, de forma a garantir a comunicação eficiente entre estes e a vigilância da infraestrutura para garantir a segurança dos passageiros. Por fim, as redes de comunicação não crítica consistem nas redes de comunicação para os passageiros que, apesar de serem fundamentais no contexto do conforto por parte dos utilizadores dos transportes de ferrovia, pelo seu grau de exigência e dificuldade de funcionamento causada pela geometria do terreno e pela velocidade das locomotivas, estas não são consideradas críticas pois a sua falha não prevê um comprometimento da segurança dos passageiros nem no normal funcionamento da infraestrutura ferroviária.

Na Tabela 2.2 é possível observar os requisitos de desempenho destes diferentes casos de utilização associados às redes ferroviárias já descritos em cima.

Tabela 2.2 - Requisitos de desempenho de casos de utilização de redes ferroviárias, baseado em [28].

Caso de Utilização	Disponibilidade	Utilizadores Conectados	Ritmo de Dados	Mobilidade	Atraso	Nº de Dispositivos
Train-to-Ground	>99.99%	-	<10 Mbps	Até 450 km/h	< 50 ms	-
Rede de Comunicação Ferroviária	>99.999%	-	1-10 Gbps	Baixa	< 10 ms	-
Comunicação de Passageiros	>95%	90%	1 Gbps	Até 400 km/h	< 500 ms	1000/carruagem

2.3.3.2 Luzes Inteligentes

O caso de utilização de luzes inteligentes é um projeto IoT desenhado para cidades inteligentes com o objetivo de reduzir o consumo energético dos candeeiros de rua. Isto é feito através da colocação de sensores nos candeeiros que comunicam com estações base 5G de forma a ser possível controlar a intensidade da luz, com base em determinados indicadores, tais como a hora do dia, intensidade de luz natural, localização, intensidade de tráfego pedestre e veicular, entre outros [29]. Estima-se que a implementação de luzes inteligentes permita poupar cerca de 60% do consumo

energético e que será possível reduzir os efeitos da poluição luminosa e aumentar a segurança dos pedestres e de condutores [30].

Em termos de requisitos, este cenário será mais exigente na densidade de dispositivos e cobertura, uma vez que para dar cobertura a todos os candeeiros de rua de uma determinada área este terá de cobrir idealmente a área toda e tendo em conta que num meio urbano a densidade de candeeiros tende a ser grande, o número de sensores também o será. Em termos de ritmo de dados, este cenário será menos exigente, tendo em conta que a informação transmitida pelos sensores tende a estar compactada em pequenas rajadas de pacotes de dados [29]. Assim, pela maior exigência de cobertura e capacidade, e ritmo de dados reduzido, este cenário pode ser caracterizado como um cenário do tipo mMTC. Na Tabela 2.3 encontram-se os requisitos do caso de utilização de luzes inteligentes.

Tabela 2.3 - Requisitos de desempenho do caso de utilização de luzes inteligentes, baseado em [30].

Requisito	Valor
Latência E2E	< 100 ms
Fiabilidade	99%
Disponibilidade	99%
Mobilidade	0 km/s
Densidade de Dispositivos	> 1 Disp/ m^2

2.3.3.3 Estacionamento Inteligente

O caso de utilização do estacionamento inteligente é também considerado como um projeto IoT para cidades inteligentes útil na gestão eficiente do tráfego veicular, uma vez que o estacionamento nas cidades tende a ser problemático, especialmente com o acréscimo do número de veículos em zonas urbanas. Assim, a ideia neste tipo de projetos é utilizar dispositivos que indiquem a disponibilidade de lugares de estacionamento, como, por exemplo, um sensor de baixo de cada um desses lugares. Depois de a rede coletar a informação dos lugares livres, esta pode ser fornecida a aplicações móveis que permitam aos condutores identificar lugares livres na sua proximidade e até reservar o mesmo antecipadamente [31].

Os requisitos deste cenário tendem a variar consoante o tipo de dispositivos a implementar, caso estes sejam sensores no lugar de estacionamento, os requisitos de *throughput* por cada sensor tendem a ser bastante reduzidos, no entanto, se forem utilizadas câmaras para monitorizar os lugares de estacionamento, o *throughput* por câmara pode ser estimado em torno dos 25 Mbps [30]. Outros indicadores que este tipo

de projetos tem em conta encontram-se relacionados com a qualidade de serviço da aplicação, onde esta tem de fornecer informação de lugares relativamente à posição atual do veículo que se encontra a deslocar a uma velocidade considerável, podendo ir até 100 km/h, e também a precisão da localização desses lugares livres. A densidade de dispositivos é um parâmetro que é variável, dependendo do tipo de equipamentos utilizados, sendo esta maior caso se utilize um sensor por cada lugar e menor caso sejam utilizadas câmaras. A disponibilidade e fiabilidade dos equipamentos é também variável consoante o grau de exigência da aplicação, podendo ir de 95% até 99.9% [30] [31]. Na Tabela 2.4 encontra-se um exemplo de um conjunto de requisitos para o cenário de estacionamento inteligente.

Tabela 2.4 - Requisitos de desempenho do caso de utilização de estacionamento inteligente, baseado em [31].

Requisito	Valor
Latência E2E	< 100 ms
Fiabilidade	95%
Disponibilidade	95%
Mobilidade	< 100 km/h
Precisão do posicionamento	< 10m
Densidade de Dispositivos	> 0.1 Disp/m ²

2.4 Ambientes de Simulação

A evolução das redes móveis para 5G é fundamental para cumprir com os requisitos de elevada capacidade dos sistemas, no entanto, surge inerentemente um acréscimo de complexidade, dado que o número de parâmetros por estação e o número de estações por unidade de área tende a crescer, aumentando a complexidade de planeamento, bem como da manutenção e otimização destas redes.

Assim, surge a necessidade de desenvolver meios e ferramentas que permitam avaliar o desempenho e as configurações de um sistema, de forma a poder ser implementado com sucesso.

2.4.1 Técnicas de validação de sistemas

Atualmente existem três formas de validar um sistema: análise teórica, através de modelos matemáticos; testes no campo; ambientes de simulação. Na Figura 2.9, é possível observar um gráfico que descreve a relação custo benefício com a utilização de cada uma destas opções.

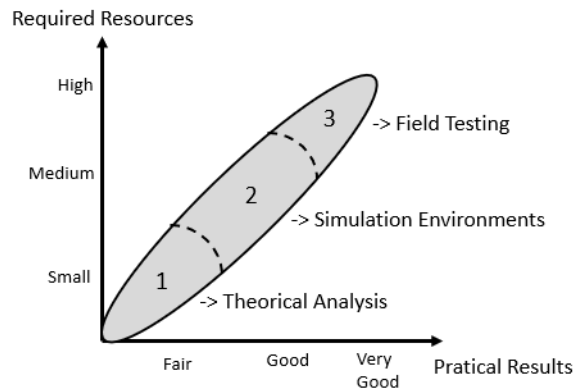


Figura 2.9 - Relação custo benefício dos métodos de validação de sistemas, baseado em [32].

- **Modelos de análise teórica** – são usados principalmente em meios de pesquisa acadêmicos, sendo baseados em modelos matemáticos. Estes modelos têm de ser implementados com base em simplificações e restrições em termos de distribuição de móveis e estações base, arquitetura do equipamento de transmissão e características do meio de propagação. A desvantagem da implementação desta estratégia é a falta de fiabilidade em cenários mais dinâmicos como a mobilidade ou o *handover*;
- **Field Testing** – é uma abordagem mais realista para novos *designs* de rede. A desvantagem de depender deste tipo de teste para cada nova implementação da rede não é prático em termos de custo, tempo e esforço necessário para realizar os testes, devendo ser apenas implementado em cenários muito específicos e nas etapas finais do planeamento;
- **Ambientes de Simulação** – com o avanço na complexidade dos sistemas 5G, o desenvolvimento de configurações de rede que maximizem vários KPIs tais como, cobertura, capacidade, eficiência energética, entre outros, é uma tarefa desafiante, havendo a necessidade de arranjar uma forma de testar estes diversos KPIs. Deste modo, é necessário recorrer a um ambiente de simulação que permita testar estes requisitos todos, produzindo resultados mais fidedignos que um modelo teórico e com custos mais reduzidos que os testes físicos da rede.

Assim, é possível verificar que os ambientes de simulação são uma boa forma de emular o desempenho de uma rede, uma vez que demonstram um bom equilíbrio nos custos e qualidade de resultados apresentados. Dentro dos ambientes de simulação, estes podem ser separados em duas categorias [12] [33] [34] [35]:

- **Simuladores ao nível da ligação** – consideram as vertentes relacionadas com a camada física da rede, focando-se no desempenho de ligações ponto a ponto podendo por vezes ser possível considerar ligações multiponto em redes sem fios de menores dimensões com um número reduzido de nós. Nestas simulações, é possível analisar o desempenho de alguns parâmetros como o *feedback* da codificação e modulação adaptativa, modelação de codificação e descodificação de canal, e modelação da camada física em geral. São úteis no desenvolvimento de estruturas de recetores, esquemas de codificação ou mecanismos de *feedback*. Estes simuladores não definem a geometria da rede, tal como o raio de célula ou as posições dos utilizadores, não precisando assim de ter em conta modelos de propagação, e faz com que não sejam eficientes no contexto de planeamento celular, *scheduling* ou gestão de interferência.
- **Simuladores ao nível do sistema** – focam-se mais em aspetos relacionados com a rede, tais como capacidade, latência, cobertura, gestão de mobilidade ou gestão de interferência, sendo adequado em simulações de redes em grande escala com um número elevado de nós de ligação. Analisam múltiplas estações base e equipamentos móveis numa área de serviço onde estas ligações podem interferir entre si, no entanto, simular todas as ligações rádio existentes tende a não ser prático, dado que isso implica um acréscimo do peso computacional do simulador. Como alternativa, estes simuladores podem assumir uma abstração da camada física através de modelos simplificados que capturam as características essenciais com uma alta precisão, reduzindo a complexidade do sistema. Tipicamente, estes simuladores também devem possuir a habilidade de lidar com diferentes perfis de utilizadores e estações base para simular eficientemente redes heterogéneas.

No contexto desta dissertação serão utilizadas ferramentas de simulação ao nível do sistema, sendo estas o *Radio Mobile – RF propagation simulation software* [36] e o *Vienna 5G System Level Simulator* [35] que serão descritos e comparados nos subcapítulos seguintes.

2.4.2 *Radio Mobile* - RF propagation simulation software

O *software Radio Mobile* é um programa gratuito e dedicado a planeamento rádio, que simula a propagação rádio e que opera no intervalo de frequências de 20 MHz a 20 GHz, cujo objetivo principal é a realização de simulações de cobertura e interferência entre estações.

De forma a fazer as simulações de cobertura tem de ter em conta alguns parâmetros como a potência de transmissão, ganhos de antenas, atenuação de cabos e atenuação de propagação calculada em função do modelo de propagação utilizado.

O simulador implementa dois modelos de propagação: o *modelo Longley-Rice Irregular Terrain Model* (ITM), usado em NLOS, tirando proveito da informação da obstrução do terreno para determinar a atenuação do sinal; e o modelo de dois raios, utilizado em LOS, onde é tido em conta a componente LOS do sinal e a componente refletida do solo. Para determinar se existe ou não linha de vista é verificada se a elipsoide de *Fresnel* se encontra obstruída.

A ausência de linha de vista pode ser causada por dois fatores principais que são a obstrução devido ao perfil de terreno, ou por obstáculos que haja no percurso. O perfil de terreno é influenciado pelos dados provenientes do projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), onde é possível obter dados relativos ao perfil de elevação de terreno a uma escala quase global e com uma boa precisão. O perfil de obstrução do terreno, também conhecido como *Land Cover* ou *Clutter*, comporta um conjunto de dados que descreve o perfil de terreno, numa determinada área, podendo ser possível distinguir diferentes classes como o urbano, vegetação rasa e diferentes variações de vegetação com diversas densidades. Estas obstruções irão ter impacto na propagação do sinal.

Em termos de *output*, esta ferramenta consegue produzir o mapa de cobertura da intensidade do sinal recebido, com base num *threshold*, e, associado a esse mapa é possível exportar um ficheiro com os dados em formato “.txt” que contém os resultados numéricos da simulação de cobertura realizada, na forma de uma lista de pontos. Na Figura 2.10, encontra-se uma representação da estrutura interna do ficheiro criado pelo programa após uma simulação de cobertura [37].

```

cartasianraster.txt
Range[tab]<range>[tab]<min_level>

List of fixed units:
Fixed unit[tab]<UnitNumber>[tab]<UnitName>[tab]<Latitude>[tab]
<Longitude>[tab]<GroundHeight>

Mobile unit used in this analysis:
Mobile unit [tab]<>[tab]<>[tab]<>[tab]<>[tab]<>

List of points in table form:
Latitude Longitude Rx(dB) Best unit
1st unit in the row
<Latitude>[tab]<Longitude>[tab]<RSSI>[tab]<StrongestUnit>
...
Last unit in the row

```

Figura 2.10 - Estrutura interna do ficheiro de análise de cobertura criado, retirado de [37].

Na primeira linha tem-se os parâmetros *<range>* que representam a diferença do nível de sinal máximo e mínimo e *<min_level>* que destaca o valor mínimo de sinal.

Depois, nos dois grupos de linhas seguintes encontra-se a lista de estações base e terminal móvel com os parâmetros:

- *<UnitNumber>* - Número identificador da unidade;
- *<UnitName>* - Nome da unidade;
- *<Latitude>* - Coordenada Latitude;
- *<Longitude>* - Coordenada Longitude;
- *<GroundHeight>* - Altura da unidade em metros;

Por fim, tem-se a lista de pontos no formato de tabela, onde para além das coordenadas de latitude e longitude, tem-se o parâmetro Rx(dB) que representa a diferença entre o valor mínimo de sinal, *<min_level>*, e o valor de sinal medido no respetivo ponto e existe o parâmetro *Best unit* que representa a unidade com mais força de sinal.

Na Figura 2.11 encontra-se um exemplo desse ficheiro, retirado de [37].

```

cartasianraster.txt
Range 70,5dB -118,6dBm
Fixed unit 6 ANT 52,59292 005,05209 0,0
Mobile unit 7 Mobile 00,00000 000,00000 9,0
Latitude Longitude Rx(dB) Best unit
52,74971 004,71522 -012,6 6
52,74971 004,71956 -010,0 6
52,74972 004,72390 -012,8 6

```

Figura 2.11 – Exemplo de conteúdo de um ficheiro de análise de cobertura criado, retirado de [37].

A partir do conteúdo do ficheiro é possível criar gráficos de *Cumulative Distribution Function* (CDF) de forma a determinar a percentagem de cobertura, gráficos de histograma e outros indicadores de estatística descritiva.

2.4.3 Vienna 5G System Level Simulator

O simulador *Vienna 5G*, obtido gratuitamente através de uma licença académica é composto por duas versões disponíveis publicamente, a versão *Link Level* (LL) [12] e a versão *System Level* (SL), implementadas na linguagem de programação orientada a objetos MATLAB. Neste documento será utilizado o simulador SL.

Este simulador realiza simulações Monte-Carlo de forma a determinar o desempenho médio da rede, sendo assim os resultados obtidos na forma de valor médio. De forma a determinar a qualidade de cada ligação individual, o SINR é avaliado. Para cada transmissão, a potência recebida de todos os transmissores é calculada através da potência de transmissão, perdas de propagação, ganho de antena em função da posição do utilizador em relação à antena de transmissão, perdas de penetração de obstáculos e *shadowing*. É de notar que o perfil de propagação não é estático, havendo um dinamismo, tanto na escolha dos modelos e parâmetros a utilizar como nas condições do ambiente de propagação, como a linha de vista, que pode ser determinada com recurso a uma variável de probabilidade ou pela presença de obstáculos que possam existir [38].

Tendo em conta que o *Vienna* SL opera apenas ao nível do sistema, de forma a reduzir a complexidade da simulação de uma rede de grandes dimensões é necessário fazer uma abstração da camada física, onde são usadas curvas de desempenho provenientes do simulador LL para fazer um mapeamento do SINR para *Bit Error Rate* (BER) para ser possível determinar o sucesso de uma ligação [38].

O simulador *Vienna* suporta heterogeneidade nas redes, suportando uma diversidade de perfis de estações base e de utilizadores [38]. Em termos da geometria da rede, para além do posicionamento das estações base e utilizadores, também é possível criar obstruções na forma de paredes ou edifícios. Adicionalmente, é possível simular cidades através do posicionamento de *Manhattan grid*, edifícios criados de forma aleatória, ou a criação de cidades reais provenientes de bases de dados da *OpenStreetMaps* (OSM), disponíveis em [39].

Em termos de *outputs*, é possível analisar diversos KPIs, tais como *throughput*, SINR, potência recebida, entre outros [38]. O simulador apresenta funções que permitem criar alguns gráficos de CDF de alguns destes indicadores de desempenho e mostrar o posicionamento completo da rede, incluindo estações base, utilizadores e obstáculos. Adicionalmente, como o simulador guarda todos os resultados na forma de estruturas de matrizes organizadas por utilizador é possível aceder a essas estruturas e criar gráficos customizados, como CDFs de outros indicadores, *heatmaps*, histogramas e também percentis e outros indicadores de estatística descritiva.

2.4.4 Comparação dos ambientes de simulação

Tendo feito a descrição resumida de cada um dos dois ambientes de simulação é possível observar algumas vantagens e desvantagens em cada um, estando estas sumarizadas na Tabela 2.5, baseada em [35], [36] e [38].

Tabela 2.5 - Vantagens e desvantagens dos ambientes de simulação, baseada em [35], [36] e [38].

Simulador	<i>Radio Mobile</i>	<i>Vienna 5G SL</i>
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil de obstrução de <i>Elevation Data</i> (projeto SRTM) e base de dados <i>Land Cover</i> permitem representação fiel do perfil de elevação do terreno e perfil dos obstáculos (edifícios, vegetação, entre outros) em áreas de grande dimensão; • Distinção entre diferentes perfis de obstrução, como edifícios, vegetação, entre outros, na atenuação do sinal; • Gera como <i>output</i>, ficheiro com todos os valores de intensidade do sinal recebido, permitindo criar gráficos adicionais como CDF, histogramas e extrair percentis dos valores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Suporta construção de objetos de edifícios em cidades com precisão real, proveniente de bases de dados OSM; • Todos os resultados de simulação, como <i>throughput</i>, intensidade do sinal recebido, SINR, CQI, entre outros, são guardados em matrizes de dados permitindo a criação de gráficos e indicadores de estatística descritiva adicionais; • Suporta frequências até 100 GHz.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Precisão do perfil de obstáculos pode limitar a fiabilidade da representação do perfil de terreno numa área de simulação mais compacta; • Modelo de propagação do simulador não calibrado para frequências acima dos 20 GHz; • Não consegue avaliar outros requisitos essenciais como o <i>throughput</i> suportado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitação de peso computacional na construção de objetos de edifícios e ruas com base no OSM restringem a área de simulação; • Construção de cidades com base em dados de OSM não distingue outros perfis de obstrução além dos edifícios e ruas; • Tempo de simulação aumenta com o maior número de elementos de antena e largura de banda.

É possível concluir que cada simulador tem o seu conjunto de vantagens e desvantagens, podendo se aferir que o *Radio Mobile* será útil em simulações para uma maior área de cobertura, estando limitado à análise de gráficos e apenas à intensidade do sinal recebido. Já o *Vienna 5G SL*, pode ser mais útil em áreas de simulação mais compactas, se for pretendido tirar proveito do mapeamento de obstruções com o auxílio do OSM, tendo a vantagem de ser possível analisar mais parâmetros relacionados com

a tecnologia 5G e encontra-se calibrado para frequências superiores às do outro simulador.

Capítulo 3 - Dimensionamento e Planeamento Inicial da Rede

O objetivo principal deste capítulo será a realização do processo de dimensionamento e planeamento de uma rede 5G para 5 cenários distintos, sendo estes o cenário urbano, rural, *High Speed Train*, *Smart Street Lighting* e *Smart Parking*. Os dois primeiros cenários são cenários de cobertura genéricos que pretendem representar uma rede pública, enquanto os restantes três estão enquadrados no contexto de redes privadas, com base no estudo dos KPIs do capítulo anterior.

É de notar que devido às diferenças que existem entre as duas ferramentas de simulação a utilizar, o cenário de estacionamento inteligente será o único a ser simulado com o simulador de *Vienna 5G* e terá uma área bastante mais compacta que os restantes cenários. Os outros cenários serão dimensionados para áreas de cobertura substancialmente maiores e serão simulados com o *Radio Mobile*.

Neste capítulo será feita uma descrição dos modelos de antena utilizados nas duas ferramentas de simulação. Depois, é feita a descrição do processo de *link budget* para poder calcular a distância inter-*site*, em cada cenário e realizar o seu planeamento. No final deste capítulo é feita a descrição e parametrização de cada cenário bem como os resultados do processo de dimensionamento e planeamento.

3.1 Modelo de antena

Nesta secção encontra-se a descrição do modelo de antena utilizada nos simuladores *Radio Mobile* e *Vienna 5G*, respetivamente.

3.1.1 *Radio Mobile*

Nesta subsecção vai ser descrito o modelo de antena da estação base utilizado na simulação das redes 5G com recurso à ferramenta de simulação *Radio Mobile*. Este simulador utiliza ficheiros de antena no formato “.ant” que contêm informação do diagrama de radiação nos planos horizontal e vertical e, tendo em conta que não foi possível na altura da escrita do documento encontrar um ficheiro de antena 5G, optou-se por criar uma antena seguindo as orientações do modelo presente no documento [19]. Esta antena 5G, designada como AAU5613, foi desenvolvida pela Huawei para instalação de redes multi-banda, multi *Radio Access Technology* (multi-RAT) e multi-serviço.

A antena AAU5613 é uma antena mMIMO com um *array* de 192 elementos de antena, mais especificamente 12 colunas e 8 linhas por cada polarização, permitindo assim a

realização de *beamforming* até 8 feixes e um ganho de 25 dBi [19]. Esta antena suporta até 17 configurações distintas [19], onde é possível definir parâmetros tais como o número de feixes, gama de *tilt* e *Half-Power Beamwidth* (HPBW) horizontal e vertical, de forma a configurar a amplitude e fase do sinal emitido. O padrão que será utilizado será o número 6 que define um HPBW horizontal de 110° e um HPBW vertical de 12°, e terá 8 feixes horizontais e 1 vertical.

O modelo de antena *beamforming* que irá permitir criar uma réplica da antena AAU5613 foi desenvolvido no trabalho final de mestrado de André Alves [19], e permite implementar uma antena mMIMO, onde é possível definir o número de feixes horizontal e vertical. Este modelo recebe como parâmetros de *input* o ângulo de elevação ou azimute (consoante o tipo do padrão de radiação), o alcance de *scanning* de feixes, o número de feixes, o HPBW por cada feixe e o *Front-to-Back Ratio* (FBR) ou *Side-Lobe-Level* (SLL) (consoante o tipo do padrão de radiação).

Na Tabela 3.1 encontram-se os parâmetros que definem a antena AAU5613, juntamente com os parâmetros usados para criar os seus diagramas de radiação.

Tabela 3.1 - Parâmetros da antena AAU5613.

Gama de frequências	Banda 42/N78: 2445 MHz – 3600 MHz Banda 43/N78: 3645 MHz – 3800 MHz
Ganho máximo	25 dBi
Polarização	+45°, -45°
FBR	30 dB
SLL	30 dB
Alcance de <i>scanning</i> de feixes horizontal	-60° a +60°
Alcance de <i>scanning</i> de feixes vertical	-15° a +15°
HPBW horizontal	110°
HPBW vertical	12°

Tendo os dados necessários, procede-se à criação do ficheiro de antena. Este ficheiro terá o formato “.ant”, compatível com o *software Radio Mobile*, e é composto por 540 linhas e 1 coluna de informação. Esta informação representa o ganho da antena, em dBi, calculado com as expressões provenientes do modelo de *beamforming* [19]. As primeiras 360 linhas representam o ganho do lobo horizontal de -180° a 180° e as restantes 180 linhas representam o ganho do lobo vertical de -90° a 90°.

Sendo esta antena dimensionada para 3 setores [19], serão criados 3 setores espaçados de 120°. Uma configuração típica será um setor a 60°, outro a 180° e um

terceiro a 300° . Assim, no *software* terá de ser aplicado um azimute correspondente ao ângulo de cada setor.

Na Figura 3.1 e Figura 3.2 encontram-se os diagramas do padrão de radiação horizontal e vertical para os 3 setores. Observando a variação do padrão em função do ângulo de azimute, é possível concluir que o ficheiro da antena foi criado corretamente.

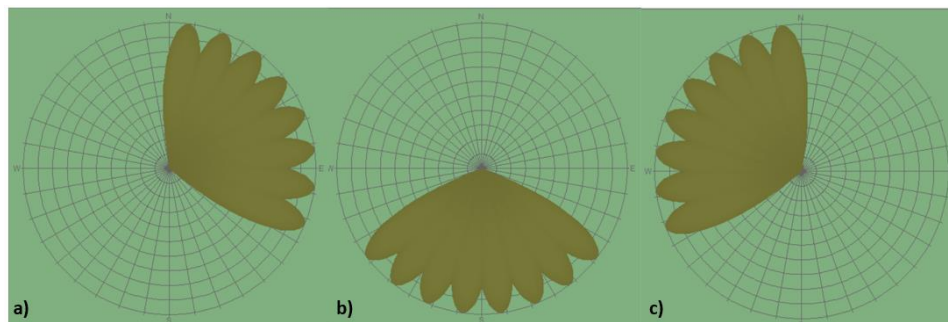


Figura 3.1 - Diagramas de radiação horizontal da antena AAU5613 na frequência dos 3.5 GHz com um ângulo de azimute de: a) 60° ; b) 180° ; c) 300° .

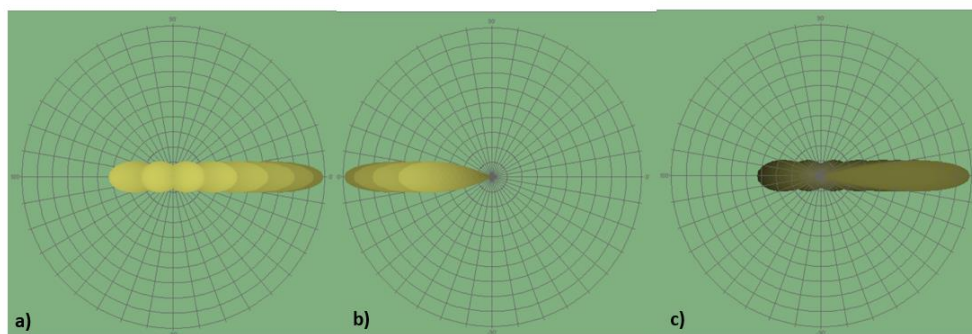


Figura 3.2 - Diagramas de radiação vertical da antena AAU5613 na frequência dos 3.5 GHz com um ângulo de azimute de: a) 60° ; b) 180° ; c) 300° .

3.1.2 Vienna 5G

Ao contrário do *Radio Mobile* o simulador *Vienna 5G* implementa, internamente, modelos de antena compatíveis com o 5G desenvolvidos pelo 3GPP, sendo as expressões utilizadas para criar o modelo de *array* de antena baseadas na documentação [15], cujos parâmetros são possíveis de configurar pelo utilizador. Os parâmetros utilizados na antena encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Parâmetros da antena utilizada no simulador *Vienna 5G*.

Ganho máximo	25 dBi
FBR	30 dB
SLL	30 dB
HPBW horizontal	65°
HPBW vertical	10°

Tal como a antena utilizada no *Radio Mobile*, esta encontra-se configurada para 3 setores espaçados de 120°, onde um setor encontra-se a 60°, outro a 180° e um terceiro a 300°.

Adicionalmente o simulador *Vienna 5G* implementa diferentes mecanismos de *precoding*, sendo que no caso desta antena, é usado um *precoder* baseado no produto *Kronecker* [38]. Este *precoder*, de acordo com [40], foi desenhado para compatibilidade com *arrays* de antena, e permite ajustar parâmetros como o fator de *oversampling* horizontal, de forma a regular o número de feixes de antena. Quanto maior for este fator, maior será o número de feixes [38]. Para esta antena optou-se por manter o valor padrão do simulador, sendo o fator de *oversampling* horizontal igual a 4.

3.2 Link budget

Nesta subsecção serão representados os cálculos efetuados de forma a fazer o dimensionamento inicial da rede, ou seja, os cálculos que representam o *link budget* e que, por sua vez, permitem determinar a distância inter-*site*, de forma a ser possível fazer o posicionamento das estações base nas áreas designadas.

O *link budget* consiste em cálculos baseados na potência de emissão, quer seja em *downlink* ou *uplink*, e em níveis de sensibilidade e ganho de forma a determinar a atenuação de propagação.

De forma a calcular o *link budget* numa rede 5G, é necessário determinar a sensibilidade do recetor, $P_{R_x,Sens}$, calculado através da expressão (3.1) [41].

$$P_{R_x,Sens} = -174 + 10 \log_{10}(SCS) + N_F + SNR \quad (3.1)$$

Onde

- SCS – Representa o espaçamento entre subportadoras em função de u em Hz;
- N_F – Será a figura de ruído, em dB;
- SNR – Representa a relação sinal ruído, em dB.

O espaçamento entre subportadoras para $u = 1$, $u = 2$ e $u = 3$ será 30 kHz, 60 kHz e 120 kHz respetivamente.

Uma aproximação do valor de SNR pode ser obtido através do teorema de *Shannon* [42], cuja fórmula é definida em (3.2).

$$C = BW \cdot \log_2(1 + SNR) \quad (3.2)$$

Onde

- BW – Representa a largura de banda, em Hz;
- C – Representa o *throughput*, em bps.

Tendo calculado a sensibilidade do recetor, é possível determinar o *Reference Signal Received Power* (RSRP) em dBm [2] através da expressão (3.3).

$$RSRP = P_{R_x, Sens} + Margens \quad (3.3)$$

Onde as margens usadas serão as margens a identificar no subcapítulo seguinte para cada um dos cenários.

Assim, é possível substituir o RSRP pela potência mínima de forma que seja garantida cobertura, adicionando à sensibilidade do recetor as margens referidas acima.

A margem de *Shadow Fading*, para garantir uma probabilidade de cobertura de $n\%$ é calculada através da expressão (3.4), onde $u(n\%)$ representa a distribuição do desvio padrão.

$$M_F = u(n\%) \cdot \sigma_{SF} \quad (3.4)$$

Tendo calculado o RSRP, em dBm, e considerando este como a potência mínima de cobertura, pode-se recorrer à expressão (3.5) [43] para determinar as perdas no percurso, resolvendo-a em função de P_L .

$$RSRP = P_{R_S} + G_{BS} - A_{Tx} + G_{UE} - PL \quad (3.5)$$

Onde

- P_{R_S} – Representa a potência de transmissão do sinal de referência em dBm;
- A_{Tx} – Representa perdas de atenuação dos cabos de instalação em dB;
- G_{UE} – Ganho da antena do terminal móvel em dBi;
- G_{BS} – Ganho da antena da estação base em dBi;
- PL – Perdas no percurso em dB.

A potência de transmissão do sinal de referência pode ser calculada através da expressão (3.6) [2].

$$P_{RS} = P_{Tx,Max} - 10 \log_{10}(N_{PRB}^{BW,u} \times 12) \quad (3.6)$$

Onde

- $P_{Tx,Max}$ – Representa a potência máxima de transmissão da estação base, em dBm;
- $N_{PRB}^{BW,u}$ – Representa o número de *Physical Resource Blocks* (PRB) em função da largura de banda e espaçamento entre subportadoras escolhidas.

Tendo finalizado os cálculos do *link budget* agora é possível calcular a distância entre *sites*. Sabendo o valor de *pathloss* atualizado com as margens adequadas é possível recorrer às expressões dos modelos de propagação escolhidos para cada cenário de forma a determinar a distância máxima entre a estação base e o terminal móvel, d_{3D} .

A partir deste valor calcula-se a distância d_{2D} através da expressão (2.2). De forma a determinar o ISD, considera-se a distância euclidiana entre dois *sites* adjacentes, sendo no caso de *sites* trisetorizados, o produto do raio da célula por um fator de 1.5.

Por fim, tendo o raio de célula, d_{2D} , é possível determinar a área da célula através da expressão (3.7) [44].

$$Area = \frac{9}{8} \times \sqrt{3} \times d_{2D}^2 \quad (3.7)$$

3.3 Dimensionamento e Planeamento dos Cenários

Nesta subsecção é feita uma descrição, dimensionamento e planeamento dos cenários de simulação, já mencionados na introdução deste capítulo. Serão descritos dois cenários de implementação genéricos com especificações gerais compatíveis com o 5G, no âmbito de redes públicas, e três cenários que representam as redes privadas introduzidas no estado da arte.

Esta descrição inclui a localização geográfica e os parâmetros assumidos para cada cenário, tais como a frequência, a largura de banda, o *throughput* alvo, o espaçamento entre subportadoras, as margens adicionais assumidas em função de cada cenário, entre outros.

Depois são mostrados os resultados do processo de dimensionamento com base nas fórmulas do subcapítulo 3.2.

Na etapa de planeamento, é feito o posicionamento de todas as estações base, e no caso do cenário SP, os sensores em adição à estação base a posicionar. Em todos os cenários, com exceção do cenário SP (que será descrito mais a frente), o processo de posicionamento das estações base será feito com o auxílio das ferramentas de *software Google Earth Pro*, disponível em [45] e QGIS [46].

Tendo calculado a ISD e área de célula, procedeu-se ao dimensionamento da grelha hexagonal. Esta foi criada através do programa QGIS. Depois de ser criada a grelha e os pontos centrais de cada hexágono, é possível exportá-los em ficheiros do tipo KML lidos pelo *Google Earth Pro*, para usar como referência visual no processo do posicionamento das estações base.

Após o desenho da grelha com base no espaçamento entre estações e a sua área, marcaram-se pontos nas interseções de forma a contabilizar o número de estações base a implementar. Após isso, deve-se analisar os pontos centrais e escolher o melhor posicionamento para cada estação base. Esse passo é fundamental uma vez que, na realidade, a probabilidade das interseções colidirem em posições favoráveis pode, em alguns casos, ser relativamente baixa tendo-se observado pontos sobre estradas, descampados, campos agrícolas, campos de futebol e edifícios demasiado baixos ou cujas condições do telhado não possibilitavam a implementação de uma estação base.

3.3.1 Cenário Urbano

A área de planeamento urbana corresponde a uma porção da zona central da cidade de Lisboa, tipicamente parte do tecido urbano a Sul da 2ª circular e excluindo a Serra do Monsanto, com uma área estimada de 5 km². Na Figura 3.3 é possível observar essa zona de planeamento.

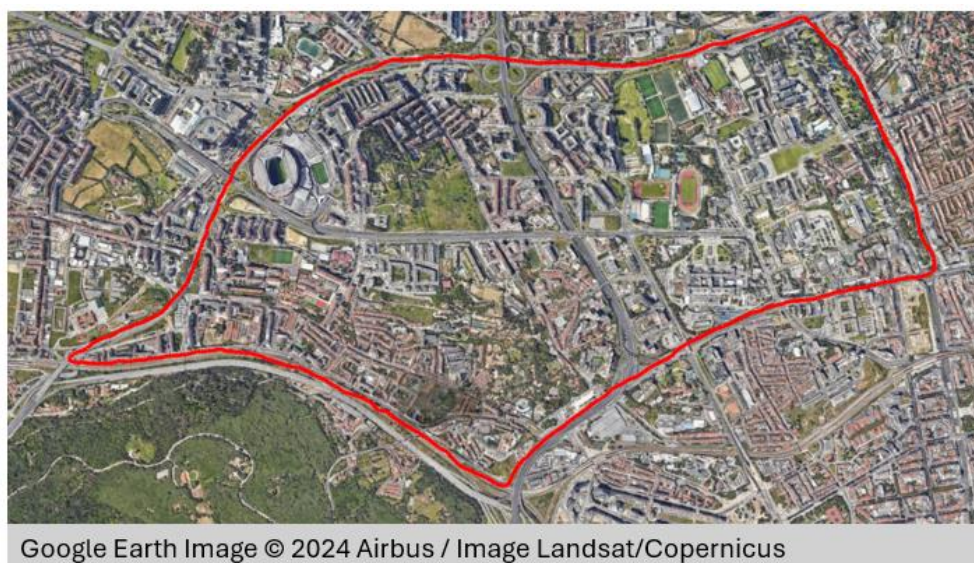


Figura 3.3 - Zona de planeamento urbana.

Na Tabela 3.3 é possível observar os parâmetros assumidos neste cenário.

Tabela 3.3 - Parâmetros assumidos para o cenário urbano.

Requisitos de Sistema	Banda de Frequência (f_c) [GHz]	3.5
	Largura de Banda (BW) [MHz]	100
	Espaçamento de Subportadoras (SCS) [kHz]	60
	Número de PRBs ($N_{PRB}^{BW,u}$)	135
	<i>Throughput</i> alvo (C) [Mbps]	100
Estação Base	Potência de Transmissão ($P_{Tx,Max}$) [dBm]	46
	Ganho da Antena (G_{BS}) [dBi]	25
	Atenuação de Cabos (A_{Tx}) [dB]	2
	Figura de Ruído (N_F) [dB]	5
Equipamento do Utilizador	Potência de Transmissão ($P_{Tx,Max}$) [dBm]	23
	Ganho da Antena (G_{UE}) [dBi]	2.15
	Figura de Ruído (N_F) [dB]	9
Margens assumidas	<i>Shadow Fading</i> 95% (M_F) [dB]	9.624
	Atenuação de Chuva ($A_r^{(p)}$) [dB]	0
	<i>Body Loss</i> [dB]	3
	Margem de Interferência [dB]	6
	Penetração O2I [dB]	20
Parâmetros de Propagação	Altura da Estação Base (h_{BS}) [m]	25
	Altura do Equipamento do Utilizador (h_{UE}) [m]	1.5
Modelo de Propagação	3GPP UMa	

Para o cenário urbano foi escolhida a frequência de 3.5 GHz, com uma largura de banda de 100 MHz e um *throughput* alvo de 100 Mbps. O espaçamento entre subportadoras assumido será de 60 kHz ($u = 2$). Para uma largura de banda de 100 MHz e um SCS de 60 kHz, o $N_{PRB}^{BW,u}$ será 135 [47].

Dentro dos parâmetros da estação base, definiu-se a potência de transmissão máxima, o ganho da antena e a atenuação dos cabos. Um valor típico para a potência máxima de transmissão da estação base será 40 W, ou seja, 46 dBm [19] e o ganho de antena foi escolhido em função do modelo de antena utilizado (ver capítulo 3.1.1) e para as perdas por atenuação dos cabos é assumido o valor típico de 2 dB [2]. Em relação aos parâmetros do terminal móvel, definiu-se o ganho da antena de 2.15 dBi [2] e para a figura de ruído é assumido o valor típico de 9 dB [2].

De forma a tornar o dimensionamento da rede o mais fidedigno e realista possível, é preciso definir margens adicionais específicas para o caso em concreto. Para o cenário urbano, são usadas as margens de *Shadow Fading*, M_F , atenuação da chuva, *Body Loss*, interferência e penetração *Outdoor-to-indoor* (O2I). A margem de atenuação da chuva para frequências abaixo dos 5 GHz pode ser descartada [17], sendo que para uma frequência de 3.5 GHz assume-se que esta margem é de 0 dB. A margem de *Shadow Fading*, para garantir uma probabilidade de cobertura de 95%, é calculada através da expressão (3.4). Na margem M_F , é assumida uma distribuição gaussiana e um desvio padrão de 6 dB. Para as margens de *Body Loss* e de interferência foram assumidos valores típicos para a frequência de 3.5 GHz [48]. No caso da margem de penetração O2I, foi assumido 20 dB [15]. É de notar que para motivos de simplificação da obtenção destes valores, esta margem foi definida tendo em conta que os utilizadores *indoor* se encontravam na proximidade de uma janela.

Os parâmetros de propagação referem-se a parâmetros de *input* para o modelo de propagação utilizado, sendo estes as alturas da estação base e terminal móvel, onde foram escolhidos os valores padrão associados ao modelo [15].

A partir dos parâmetros assumidos é possível realizar o cálculo do *link budget*, bem como o ISD e a área de célula, necessários nas etapas do planeamento. Todos os parâmetros calculados nas etapas descritas no subcapítulo do *link budget* encontram-se na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Resultados do *link budget* para o cenário urbano.

Urbano	
SNR [dB]	0
P_{R_S} [dBm]	13.90
$P_{R_x,Sens}$ [dBm]	-117.22
RSRP [dBm]	-78.59
PL [dB]	117.65
d_{3D} [m]	243
d_{2D} [m]	242
ISD [m]	363
Area [km ²]	0.114

É possível observar que o valor do ISD é de 363 metros e a área é de 0.114 km². A partir desses valores, com recurso à ferramenta QGIS, foi feita uma grelha “hexagonal”,

onde os pontos centrais foram destacados. Na Figura 3.4 encontra-se a grelha dimensionada para a rede urbana.

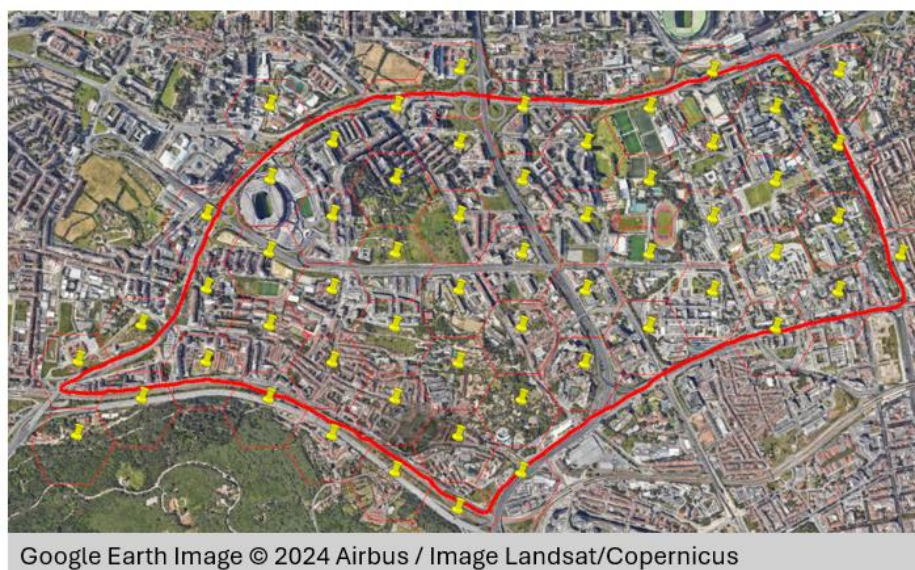


Figura 3.4 - Dimensionamento da grelha e pontos centrais das estações base urbanas.

Na zona urbana, idealmente pretende-se colocar as estações no topo de edifícios suficientemente altos, no entanto, caso isso não seja possível, implementa-se alternativamente uma torre de 25 metros. Um exemplo da colocação de uma estação base no topo de um edifício encontra-se na Figura 3.5, onde se observa que o ponto central da estação base designada de “BTS_14” encontrava-se em cima de um terreno vazio, no qual poderia ser construída uma torre, no entanto, optou-se por colocar no topo de um edifício próximo.

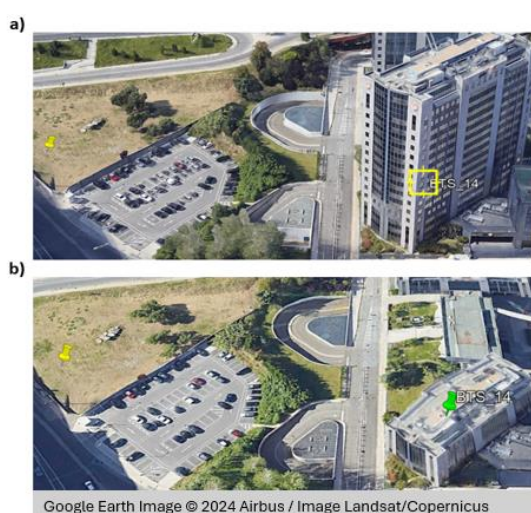


Figura 3.5 - Exemplo da colocação de uma estação base no topo de um edifício em Lisboa com perspetiva visual dos edifícios em: a) 3D e b) 2D.

Na Figura 3.6 é possível observar um exemplo da colocação de uma estação base na forma de torre, onde originalmente o seu ponto central se encontrava sobre um campo de futebol.

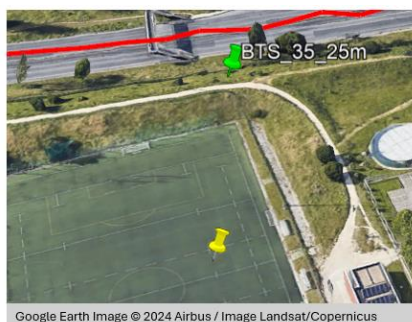


Figura 3.6 - Exemplo da colocação de uma estação base na forma de torre em Lisboa.

Na Figura 3.7 encontra-se a grelha e posicionamento final das estações base para a zona urbana de Lisboa.

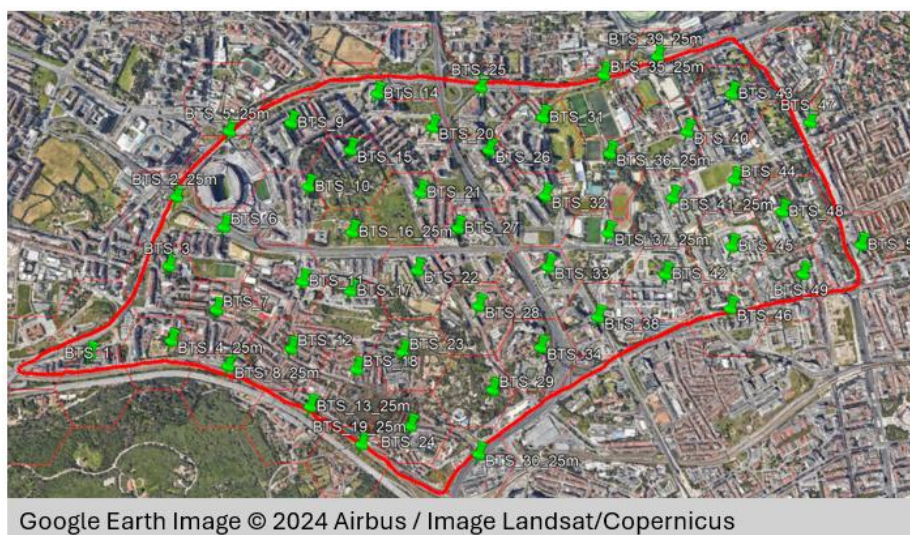


Figura 3.7 - Dimensionamento da grelha e posicionamento das estações base urbanas.

Na zona onde foi colocada a “BTS_1” havia 3 células a cobrir essa zona, cujas estações teriam de ser colocadas fora da zona da cobertura e, tendo em conta que nenhuma dessas 3 cobria a zona na sua maioria, optou-se por colocar apenas 1 estação no topo de um edifício nessa zona que é designada de “BTS_1” de forma a poupar recursos na implementação de estações adicionais.

3.3.2 Cenário Rural

A zona de planeamento rural corresponde às localidades do município de Ferreira do Alentejo e Beja, juntamente com o itinerário principal IP8 entre essas duas localidades. Opcionalmente, também foi incluída a vila de Beringel que tem ligação com o mesmo itinerário. Esta zona tem uma área estimada de 40 km^2 . Na Figura 3.8 é possível observar essa zona de planeamento.



Figura 3.8 - Zona de planeamento rural.

Na Tabela 3.5 é possível observar os parâmetros assumidos neste cenário.

Tabela 3.5 - Parâmetros assumidos para o cenário rural.

Requisitos de Sistema	Banda de Frequência (f_c) [GHz]	3.5
	Largura de Banda (BW) [MHz]	100
	Espaçamento de Subportadoras (SCS) [kHz]	60
	Número de PRBs ($N_{PRB}^{BW,u}$)	135
	Throughput alvo (C) [Mbps]	100
Estação Base	Potência de Transmissão ($P_{Tx,Max}$) [dBm]	46
	Ganho da Antena (G_{BS}) [dBi]	25
	Atenuação de Cabos (A_{Tx}) [dB]	2
	Figura de Ruído (N_F) [dB]	5
Equipamento do Utilizador	Potência de Transmissão ($P_{Tx,Max}$) [dBm]	23
	Ganho da Antena (G_{UE}) [dBi]	2.15
	Figura de Ruído (N_F) [dB]	9
Margens assumidas	Shadow Fading 95% (M_F) [dB]	12.832
	Atenuação de Chuva ($A_r^{(p)}$) [dB]	0
	Body Loss [dB]	3

	Margem de Interferência [dB]	6
	Penetração O2I [dB]	5
	Penetração Veicular [dB]	5
Parâmetros de Propagação	Altura da Estação Base (h_{BS}) [m]	35
	Altura do Equipamento do Utilizador (h_{UE}) [m]	1.5
	Altura média dos edifícios (h) [m]	5
	Largura média das ruas (W) [m]	20
Modelo de Propagação	3GPP RMa	

Os parâmetros assumidos para o caso do cenário rural serão semelhantes aos parâmetros escolhidos no cenário urbano, com exceção de algumas margens adicionais e parâmetros associados ao modelo de propagação. Quanto às margens adicionais, foram alteradas as margens de *Shadow Fading* e O2I. Para a primeira foi assumida a mesma probabilidade de cobertura de 95% e foi escolhido um valor de desvio padrão de 8 dB, associado ao respetivo modelo de propagação utilizado. Tendo em conta que o cenário rural tem dois tipos de zonas de interesse distintas, sendo estas as localidades e a IP8, assumiram-se duas margens distintas para cada um destes tipos. Para as localidades foi assumida a margem O2I a 5 dB [49] e para a IP8 utilizou-se uma margem de penetração veicular também a 5 dB [50]. Nos parâmetros de propagação, o modelo 3GPP RMa necessita adicionalmente da altura média dos edifícios e da largura média das ruas, tendo-se mantido os valores padrão [15].

Na Tabela 3.6, encontram-se todos os parâmetros calculados na etapa do dimensionamento do *link budget*.

Tabela 3.6 - Resultados do *link budget* para o cenário rural.

Rural	
SNR [dB]	0
P_{RS} [dBm]	13.90
$P_{Rx,Sens}$ [dBm]	-117.22
RSRP [dBm]	-90.38
PL [dB]	129.44
d_{3D} [m]	943
d_{2D} [m]	942
ISD [m]	1414
Area [km ²]	1.731

A partir do ISD e da área, é possível criar a grelha hexagonal e os respetivos pontos centrais da rede rural, que se encontra na Figura 3.9.

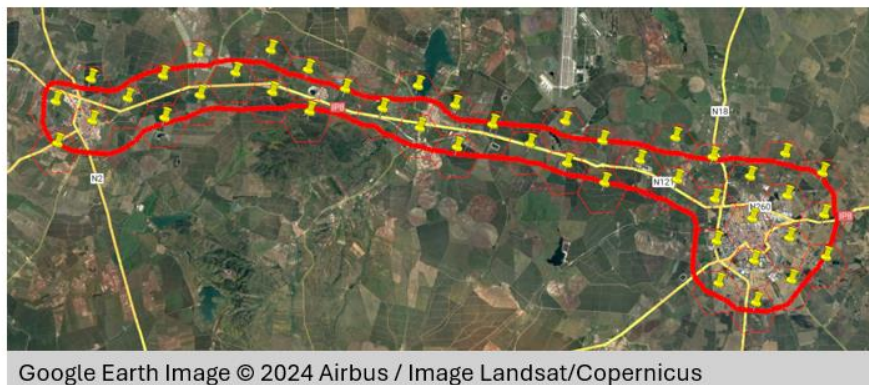


Figura 3.9 - Dimensionamento da grelha e pontos centrais das estações base rurais.

Para a zona rural, o processo de posicionamento das estações vai seguir uma lógica diferente do urbano. Tendo em conta o perfil do terreno e das edificações e outros obstáculos, todas as estações foram implementadas na forma de torres com uma altura de 35 metros. Outro aspeto que foi tido em conta foi o posicionamento das estações de forma a cobrir a IP8, ou seja, havia diversos instantes em que a grelha iria requerer o posicionamento de estações em zonas espalhadas em torno da estrada, em alguns casos bastante afastadas. Por via da otimização, optou-se por não seguir a grelha no que toca ao posicionamento de torres apenas para cobertura 5G no itinerário principal e, assim, estas torres foram colocadas em fila perto da estrada e respeitando o ISD calculado.

Na Figura 3.10 é possível observar o posicionamento de torres em torno da IP8 e, comparando com os pontos centrais nos hexágonos, é possível observar que o número de estações necessárias para cobrir a IP8 com base nesta estratégia é mais baixo, o que permite otimizar custos num projeto de dimensionamento de cobertura. Outra razão que justifica a implementação das estações desta forma, pode ser a facilidade de acesso por parte de técnicos de manutenção em operações de manutenção de infraestrutura futura.

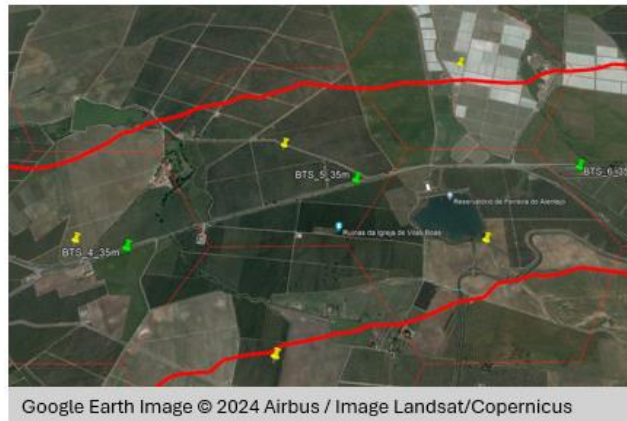


Figura 3.10 - Exemplo de posicionamento de estações para cobertura apenas na IP8.

Na Figura 3.11 é possível observar o posicionamento das estações base na zona de Beja. Tendo em conta que esta se trata de uma zona habitacional, o posicionamento das torres seguiu a grelha definida.

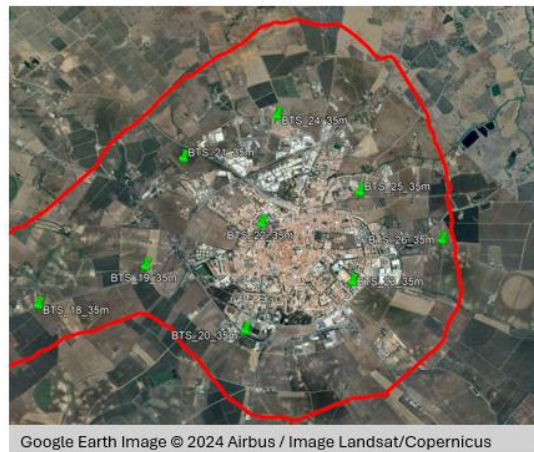


Figura 3.11 - Exemplo de posicionamento de estações numa das zonas habitacionais no cenário rural.

Na Figura 3.12 encontra-se a grelha e o posicionamento final das estações base para a zona rural entre o município de Ferreira do Alentejo e Beja.

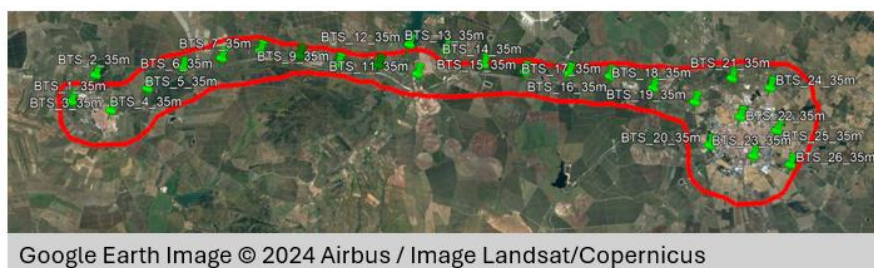


Figura 3.12 - Dimensionamento da grelha e posicionamento das estações base rurais.

3.3.3 High Speed Train

O cenário HST consiste num trajeto de comboio entre as estações das localidades de Esmoriz e Canelas, que tem um comprimento de aproximadamente 28 km. Na Figura 3.13 encontra-se o trajeto referido.



Figura 3.13 - Trajeto do cenário HST.

A escolha deste trajeto teve por base o projeto da Linha de Alta Velocidade Porto – Lisboa da Infraestruturas de Portugal [51], separada em 3 fases, tal como se pode observar na Figura 3.14. O trajeto escolhido encontra-se entre a porção do trajeto entre Aveiro e Vila Nova de Gaia.



Figura 3.14 - Planeamento faseado da linha de alta velocidade entre Porto e Lisboa, retirado de [51].

Tal como foi dito na introdução dos KPIs, o cenário das redes ferroviárias poderá ser dimensionado de formas distintas consoante o objetivo principal da rede. Assim, irá ser simulada a cobertura para o cenário não crítico da comunicação de passageiros, onde a cobertura é menos restrita que a vertente crítica, no entanto, terá maiores exigências quanto ao ritmo de dados que deverá suportar. A ideia deste cenário consiste em posicionar estações base de 10 metros [52] de altura, sequencialmente ao longo da linha, com um espaçamento em relação a esta de 5 metros [52]. A arquitetura da rede

neste cenário é do tipo *one-hop* [53], onde os terminais móveis dos passageiros se ligam diretamente à estação base, tal como é possível de observar na representação esquemática da Figura 3.15. Nos sistemas HST, a camada de revestimento metálica aplicada nas carruagens, que lhes permite um bom isolamento térmico, causa a reflexão de frequências rádio o que leva a perdas de penetração de entre 7 e 25 dB, ou de 3 a 7 dB caso os utilizadores se encontrem sentados ao lado de uma janela [54].

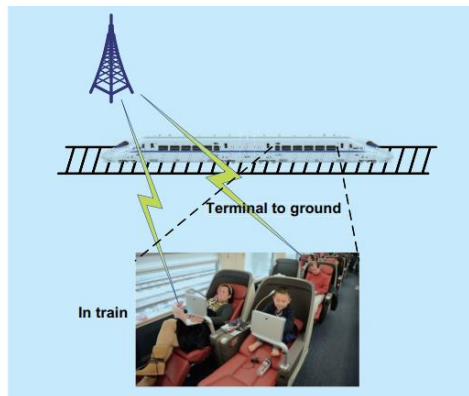


Figura 3.15 - Representação esquemática da arquitetura *one-hop* da rede HST, retirado de [53].

Na Tabela 3.7 encontram-se os parâmetros assumidos neste cenário.

Tabela 3.7 - Parâmetros assumidos para o cenário HST.

Requisitos de Sistema	Banda de Frequência (f_c) [GHz]	3.5
	Largura de Banda (BW) [MHz]	100
	Espaçamento de Subportadoras (SCS) [kHz]	60
	Número de PRBs ($N_{PRB}^{BW,u}$)	135
	Throughput alvo (C) [Mbps]	1000
Estação Base	Potência de Transmissão ($P_{Tx,Max}$) [dBm]	50
	Ganho da Antena (G_{BS}) [dBi]	25
	Atenuação de Cabos (A_{Tx}) [dB]	2
	Figura de Ruído (N_F) [dB]	5
Equipamento do Utilizador	Potência de Transmissão ($P_{Tx,Max}$) [dBm]	23
	Ganho da Antena (G_{UE}) [dBi]	2.15
	Figura de Ruído (N_F) [dB]	9
Margens assumidas	Shadow Fading 95% (M_F) [dB]	6.416
	Atenuação de Chuva ($A_r^{(p)}$) [dB]	0
	Body Loss [dB]	3
	Margem de Interferência [dB]	6
	Perdas penetração no comboio [dB]	16

Parâmetros de Propagação	Altura da Estação Base (h_{BS}) [m]	10
	Altura do Equipamento do Utilizador (h_{UE}) [m]	3
Modelo de Propagação	Winner II	

Tal como foi observado na descrição dos KPIs para cenários de ferrovia, a comunicação de passageiros terá uma maior exigência no ritmo de dados, sendo de 1 Gbps. Neste cenário, optou-se por manter a frequência de 3.5 GHz ao invés de usar uma banda mais baixa, como a de 700 MHz, pelo facto de que a faixa dos 3.5 GHz permitir suportar os requisitos de largura de banda e *throughput*, tendo a desvantagem de ser menos adequada para requisitos de cobertura mais exigentes, não sendo crítico neste caso, e que irá envolver um maior número de estações base a dimensionar. Neste cenário em particular, com uma maior exigência de *throughput*, poder-se-ia considerar uma frequência mais alta na faixa das ondas milimétricas, como por exemplo 28 GHz, no entanto, esta não seria adequada em termos de cobertura, pois as frequências mais altas sofrem maiores perdas de propagação, necessitando assim de uma quantidade substancialmente maior de estações base, o que acresceria em custos financeiros. Para além disso, existem outros fatores limitativos como as perdas elevadas de atenuação causadas pelo revestimento da carruagem que iriam inviabilizar a penetração do sinal, e a própria velocidade de deslocação do comboio, combinada com esta elevada frequência, poderia aumentar a intensidade do efeito *Doppler*. Assim, a frequência dos 3.5 GHz seria a melhor opção neste cenário. De forma a reduzir o número de estações base ao longo do percurso, é possível tentar maximizar o seu raio de cobertura aumentando a potência de transmissão, tendo se optado por uma potência de 50 dBm. Nas margens assumidas, assumiu-se uma margem de *shadow fading* para uma probabilidade de cobertura de 95% calculada com o desvio padrão associado ao modelo escolhido. A margem de penetração no comboio escolhida foi 16 dB com base na gama de valores possíveis. As restantes margens são semelhantes às dos cenários já discutidos.

Nos parâmetros, de propagação foi assumida a altura de estação base a 10 metros e 3 metros para o utilizador (estimativa da altura do telemóvel na mão de um utilizador sentado somada com a altura adicional da carruagem) [55]. O modelo de propagação utilizado será o *Winner II*. É de notar que o 3GPP também suporta a implementação do cenário HST sob o modelo 3GPP RMa usado no cenário rural, pelo que seria possível usar o mesmo modelo para o cenário HST. No entanto, deve-se ter em conta a possibilidade de usar outros modelos que possam ser mais precisos em cenários mais específicos. De acordo com [56] e [57], onde se testou o desempenho dos modelos

Winner, 3GPP e outros para cenários de redes móveis, verificou-se que o *Winner* tinha um desempenho melhor neste tipo de cenários provando a fidedignidade deste modelo. Depois de escolher os parâmetros do cenário, são realizados os cálculos de link budget, cujos resultados, se podem observar na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Resultados do *link budget* para o cenário HST.

HST	
SNR [dB]	30.10
P_{R_s} [dBm]	17.90
$P_{R_x,Sens}$ [dBm]	-87,12
RSRP [dBm]	-55.70
PL [dB]	98.76
d_{3D} [m]	481
d_{2D} [m]	480
ISD [m]	721
Area [km ²]	N. A.

No cenário do HST não é necessário seguir o dimensionamento de grelha hexagonal tradicional. Tal como foi feito na colocação de estações na IP8 no cenário rural, o processo de colocação de estações para este caso será em fila respeitando o ISD e cada estação deve estar a 5 metros da linha.

Na Figura 3.16 encontra-se realizado o posicionamento final das estações base para o cenário HST, tendo totalizado 39 estações.



Figura 3.16 - Posicionamento das estações base HST.

3.3.4 Smart Street Lighting

A área de planeamento para o cenário SSL situa-se na mesma zona que a área de planeamento urbana, alargando, neste caso até Campolide e atingindo uma área total de aproximadamente 16 km^2 . Na Figura 3.17 é possível observar essa zona de planeamento.

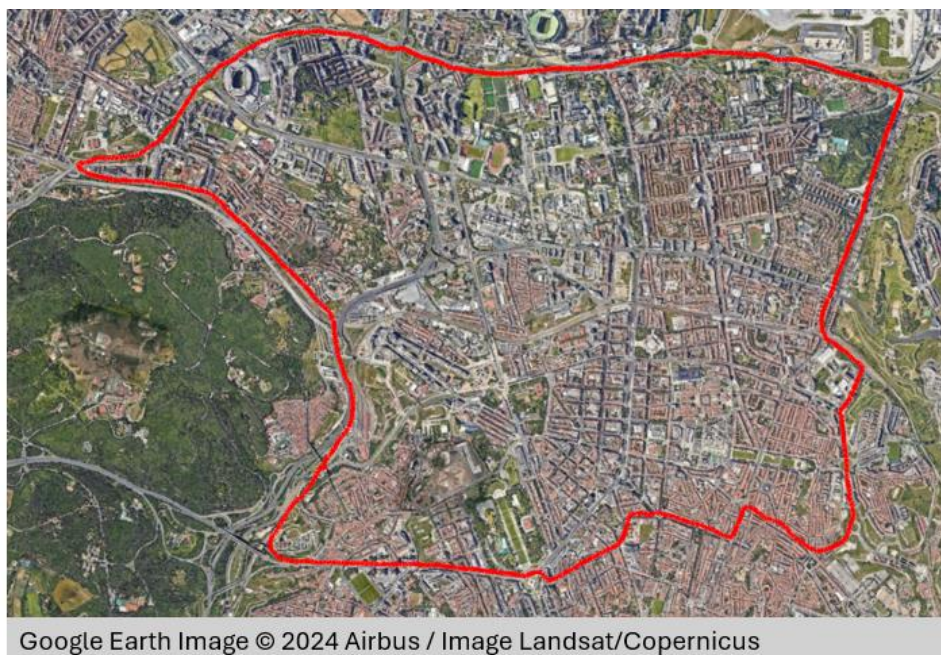


Figura 3.17 - Zona de planeamento SSL.

Uma diferença que este cenário tem em relação aos restantes é que o terminal móvel neste caso não é um telemóvel, mas sim um sensor localizado no poste de um candeeiro de iluminação, sendo que não existe mobilidade. Tendo em conta que este cenário tem uma exigência de *throughput* muito reduzida por dispositivo [29], mas um requisito elevado de densidade de equipamentos, optou-se por tentar assumir um valor de *throughput* para o dimensionamento do *link budget* que consiga satisfazer o requisito de densidade de dispositivos mais elevado.

Assim, é necessário saber o número de candeeiros que se pretende cobrir. De forma a ter uma estimativa o mais precisa possível acedeu-se ao website Gestor *Geodados* da Câmara Municipal de Lisboa [58], onde foi possível consultar um mapa com a localização de todos os candeeiros de Lisboa. Adicionalmente, é possível filtrar o número de candeeiros em função de uma área desejada, sendo esta a zona de planeamento já descrita, podendo-se observar o posicionamento de todos os candeeiros na Figura 3.18.

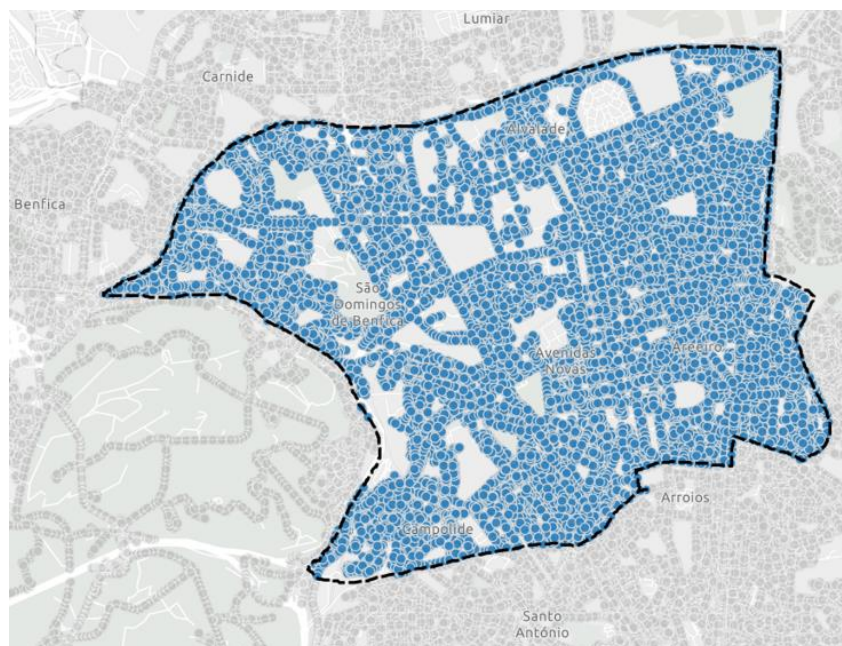


Figura 3.18 - Posicionamento dos candeeiros na zona de planeamento em Lisboa, retirado de [58].

Após a filtragem, verificou-se que o número total de candeeiros é de 22060. No entanto, este conjunto de dados engloba diversos tipos de candeeiros como postes, colunas, consolas, entre outros, sendo que no contexto de planeamento se apenas consideraram os postes de iluminação. De forma a fazer a filtragem, deve ser realizada a exportação destes dados para um ficheiro *Excel* e filtrar apenas o tipo de candeeiro desejado. Após realizar este processo, determinou-se que o número de postes de candeeiro dentro da zona de planeamento é 11001.

Sabendo o número de postes de iluminação, assumiu-se um valor de *throughput* máximo para cada sensor de 10 kbps, um pouco acima dos valores típicos [29], de forma a garantir uma melhor fiabilidade do sistema. Partindo do pressuposto de que todos os sensores dentro desta área se encontram ativos, estima-se que o *throughput* por km^2 seja de $6.88 \text{ Mbps}/km^2$. Assim, o *throughput* alvo escolhido para a estação base deverá suportar este requisito.

Na Tabela 3.9 encontram-se os parâmetros assumidos neste cenário.

Tabela 3.9 - Parâmetros assumidos para o cenário SSL.

Requisitos de Sistema	Banda de Frequência (f_c) [GHz]	0.7
	Largura de Banda (BW) [MHz]	10
	Espaçamento de Subportadoras (SCS) [kHz]	30
	Número de PRBs ($N_{PRB}^{BW,u}$)	24
	<i>Throughput</i> alvo (C) [Mbps]	50
Estação Base	Potência de Transmissão ($P_{Tx,Max}$) [dBm]	46
	Ganho da Antena (G_{BS}) [dBi]	25
	Atenuação de Cabos (A_{Tx}) [dB]	2
	Figura de Ruído (N_F) [dB]	5
Equipamento do Sensor	Potência de Transmissão ($P_{Tx,Max}$) [dBm]	23
	Ganho da Antena (G_{UE}) [dBi]	2.15
	Figura de Ruído (N_F) [dB]	9
Margens assumidas	<i>Shadow Fading</i> 99% (M_F) [dB]	13.956
	Atenuação de Chuva ($A_r^{(p)}$) [dB]	0
	Margem de Interferência [dB]	6
Parâmetros de Propagação	Altura da Estação Base (h_{BS}) [m]	25
	Altura do Equipamento do Utilizador (h_{UE}) [m]	8
Modelo de Propagação	3GPP UMa	

Em termos de requisitos de sistema optou-se por utilizar uma frequência mais baixa, na faixa dos 700 MHz, em vez dos 3.5 GHz utilizados nos restantes cenários. A razão inerente deve-se ao facto de no 5G a faixa dos 700 MHz ser mais benéfica em aplicações IoT, onde é exigida uma maior cobertura e menores ritmos de transmissão. Tendo em conta que nesta faixa de frequências há menos espectro disponível e que os requisitos em termos de ritmo de dados não são tão exigentes, assumiu-se 10 MHz de largura de banda. O *throughput* será de 50 Mbps. Neste cenário, sabendo os parâmetros de frequência mais baixa e *throughput* menos exigente, estima-se que o raio da célula seja maior que nos outros cenários pelo que se assume um valor de SCS de apenas 30 kHz. Para uma largura de banda de 10 MHz e um SCS de 30 kHz, o $N_{PRB}^{BW,u}$ será 24 [47]. Os parâmetros para a estação base serão os mesmos que os do cenário urbano. No caso do equipamento do sensor é possível utilizar os mesmos parâmetros já assumidos anteriormente para um terminal de móvel [59]. Nas margens adicionais, foram assumidas uma margem de SF para 99% de probabilidade de cobertura, sendo neste caso mais exigente que nos cenários

anteriores, e, adicionalmente, uma margem de interferência. Ao contrário do que foi assumido no cenário urbano, não foram adicionadas margens O2I, tendo em conta que os sensores se encontram todos em meio *outdoor*, e também não foi usada uma margem de *Body Loss* uma vez que a altura do posicionamento dos sensores não justifica a adição dessa margem.

A altura da estação base manteve-se igual à do cenário urbano e para a altura do sensor foi assumido 8 metros, altura típica de um poste de iluminação em Lisboa [60]. O modelo de propagação utilizado será o mesmo que foi utilizado no cenário urbano, 3GPP UMa. Depois de escolher os parâmetros do cenário, são realizados os cálculos de link budget, cujos resultados, se podem observar na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Resultados do *link budget* para o cenário SSL.

SSL	
SNR [dB]	14.91
P_{R_S} [dBm]	21.40
$P_{R_x,Sens}$ [dBm]	-105.32
RSRP [dBm]	-85.36
PL [dB]	131.91
d_{3D} [m]	1616
d_{2D} [m]	1616
ISD [m]	2424
Area [km ²]	5.088

Particularmente neste cenário, após os cálculos, ainda é preciso verificar se o sistema cumpre os requisitos de capacidade de 6.88 Mbps/km². Sabendo a área de cada estação base e o *throughput* base para o qual foi dimensionada (50 Mbps), verifica-se que cada estação base está dimensionada para suportar ritmos de transmissão de 9.83 Mbps/km². Sendo este valor maior que o valor mínimo pretendido, é possível concluir que esta rede consegue suportar os requisitos mínimos de capacidade.

Na Figura 3.19 é possível observar a grelha dimensionada para a rede SSL.

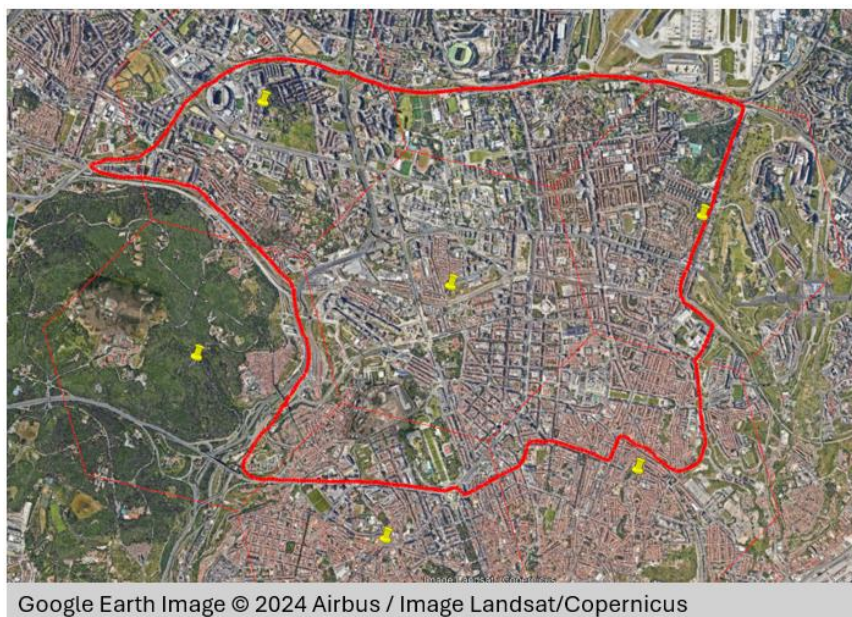


Figura 3.19 - Dimensionamento da grelha e pontos centrais das estações base SSL.

O método de posicionamento das estações base será semelhante ao método aplicado no cenário urbano, sendo que neste caso não foi necessário implementar nenhuma torre. Na Figura 3.20 encontra-se a grelha e posicionamento final das estações base para a zona urbana de Lisboa.

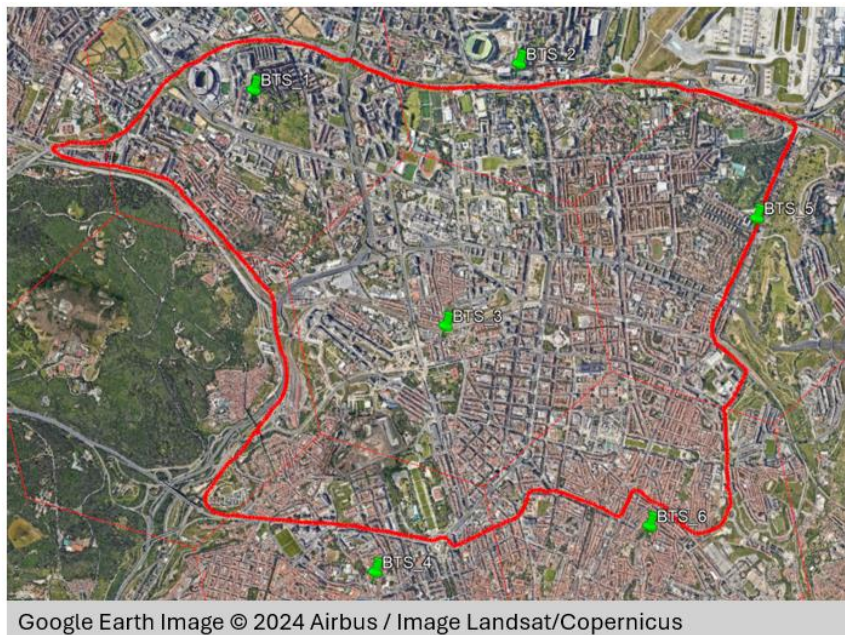


Figura 3.20 - Dimensionamento da grelha e posicionamento das estações base SSL.

É de notar que algumas das estações base encontram-se fora da zona de planeamento pois é necessário garantir a cobertura na área desejada e respeitar o máximo possível a ISD. Desta forma, a rede terá 6 estações base.

3.3.5 Smart Parking

O cenário SP foi dimensionado numa parte de um parque de estacionamento perto do terminal rodoviário de Aveiro, com uma área estimada em torno de 10500 m^2 . A zona de planeamento, que se encontra na Figura 3.21, é uma das zonas dimensionadas no projeto de *Smart Parking* da Aveiro Tech City Living Lab [61] que recorre a sensores para detetar entradas e saídas de carros e verificar o número de lugares disponíveis. Neste projeto de dimensionamento serão utilizados sensores nos lugares de estacionamento [31], um em cada lugar, totalizando 295 sensores dentro da área de planeamento.

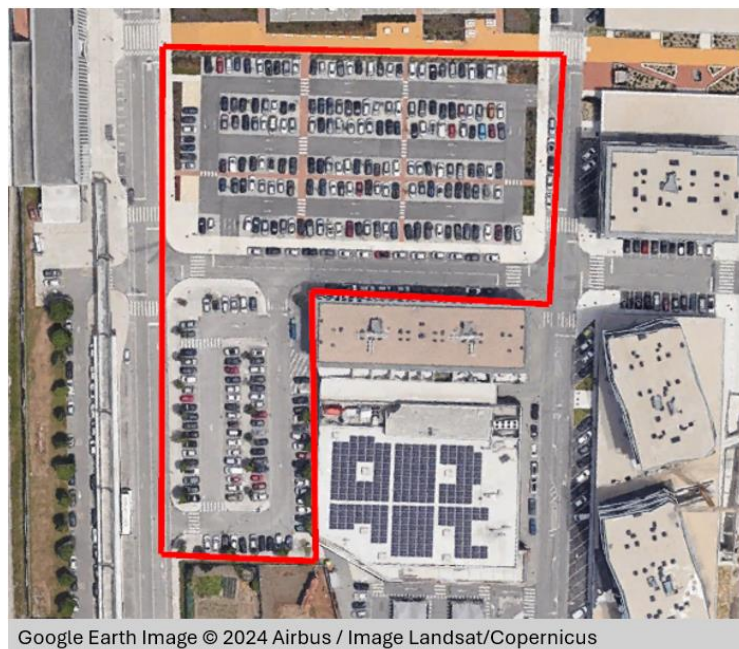


Figura 3.21 - Zona de planeamento SP.

Tal como no cenário de luzes inteligentes, o requisito de *throughput* por dispositivo é reduzido, e também será tida em conta a densidade de sensores no local. Sendo este um cenário com uma área de dimensionamento muito compacta em relação às luzes inteligentes, pretende-se utilizar apenas 1 estação e assim o *throughput* escolhido será o produto do número de sensores pelo *throughput* individual de cada um. Assumindo o mesmo *throughput* utilizado para cada sensor no cenário SSL e sabendo que existem 295 lugares de estacionamento, o *throughput* total para a estação base será de 2.95 Mbps.

Na Tabela 3.11 encontram-se os parâmetros assumidos neste cenário.

Tabela 3.11 - Parâmetros assumidos para o cenário SP.

Requisitos de Sistema	Banda de Frequência (f_c) [GHz]	28	3.5
	Largura de Banda (BW) [MHz]	100	100
	Espaçamento de Subportadoras (SCS) [kHz]	120	60
	Número de PRBs ($N_{PRB}^{BW,u}$)	66	135
	<i>Throughput</i> alvo (C) [Mbps]	2.95	2.95
Estação Base	Potência de Transmissão ($P_{Tx,Max}$) [dBm]	43	43
	Ganho da Antena (G_{BS}) [dBi]	25	25
	Atenuação de Cabos (A_{Tx}) [dB]	2	2
	Figura de Ruído (N_F) [dB]	5	5
Equipamento do Sensor	Potência de Transmissão ($P_{Tx,Max}$) [dBm]	23	23
	Ganho da Antena (G_{UE}) [dBi]	2.15	2.15
	Figura de Ruído (N_F) [dB]	9	9
Margens assumidas	<i>Shadow Fading</i> 99% (M_F) [dB]	18.189	18.189
	Atenuação de Chuva ($A_r^{(p)}$) [dB]	1,5	0
	Atenuação Atmosférica (A_a) [dB]	0.04	0
	<i>Body Loss</i> [dB]	8.5	3
	Margem de Interferência [dB]	1	6
	Penetração Veicular [dB]	10	5
Parâmetros de Propagação	Altura da Estação Base (h_{BS}) [m]	11	11
	Altura do Equipamento do Utilizador (h_{UE}) [m]	0	0
Modelo de Propagação	3GPP UMi		

Neste cenário, será feito o dimensionamento para duas frequências distintas, 28 GHz e 3.5 GHz, de forma a avaliar o desempenho de ambas as frequências com o simulador *Vienna 5G SL*. Para ambas as frequências, será assumida a mesma largura de banda de 100 MHz. O SCS assumido na faixa das ondas milimétricas será de 120 kHz e para a faixa dos 3.5 GHz será de 60 kHz, tal como nos outros cenários que usam esta frequência. Para a frequência de 28GHz, com uma largura de banda de 100 MHz e um SCS de 120 kHz, o $N_{PRB}^{BW,u}$ será 66 [47]. No caso dos 3.5 GHz, o $N_{PRB}^{BW,u}$ será 135.

Para os parâmetros da estação base foi escolhido, em ambos os casos, um valor de potência de transmissão de 43 dBm, tipicamente utilizado em cenários UMi [19], mantendo os valores utilizados nos outros cenários.

Os parâmetros utilizados para os sensores são os mesmos que foram utilizados no cenário SSL.

Nas margens adicionais, optou-se por usar uma margem de SF para 99% de probabilidade de cobertura. Adicionalmente, foram assumidas, para ambas as frequências, as margens de interferência típicas de cada frequência [48], *Body Loss* e penetração veicular. Para os 3.5 GHz, foram escolhidos os valores típicos utilizados em cenários anteriores. Para as ondas milimétricas, foram assumidos 8.5 dB de *Body Loss* [62] e 10 dB para a margem de penetração veicular [63]. Por fim, foi calculada uma margem de chuva para a faixa das ondas milimétricas, com recurso às equações disponíveis no subcapítulo 2.2.3, onde foi assumida uma distância máxima de 200 metros, obtendo-se o valor de 1.5 dB para uma disponibilidade de ligação de 99.99%, e utilizou-se ainda uma margem de atenuação atmosférica de 0.04 dB para a mesma distância máxima de 200 metros, calculada com as equações também disponíveis em 2.2.3.

A altura da estação base é de 11 metros colocada no topo de um dos edifícios e a altura do sensor, estando no chão, será de 0 metros. O modelo de propagação utilizado nos cálculos de *link budget* deste cenário é o 3GPP UMi.

Após a escolha dos parâmetros adequados ao cenário, são realizados os cálculos do *link budget*, cujos resultados encontram-se na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Resultados do *link budget* para o cenário SP.

	SP 28GHz	SP 3.5GHz
SNR [dB]	-16.85	-16.85
P_{R_S} [dBm]	14.01	10.90
$P_{R_x,Sens}$ [dBm]	-131.06	-134.07
<i>RSRP</i> [dBm]	-91.82	-101.87
<i>PL</i> [dB]	130.98	137.93
d_{3D} [m]	155	855
d_{2D} [m]	155	855
<i>ISD</i> [m]	232	1282
<i>Area</i> [km ²]	0.046	1.42

É possível observar que o raio de célula é grande o suficiente, em ambas as frequências, para garantir que se utilize apenas 1 estação base para cobrir a área desejada. Para além disso, no caso dos 28 GHz, as margens adicionais de chuva e atmosfera estão dimensionadas para uma distância maior que a área de cobertura da célula, garantindo assim robustez contra esses fenómenos atmosféricos na extensão completa da célula. Na etapa de planeamento deste cenário foram criados edifícios em torno da área de simulação do parque de estacionamento para mostrar a execução e o resultado da criação de um perfil de obstrução, com base nos dados OSM. Depois, foi colocada manualmente uma estação base no topo do edifício mais próximo do parque e foram colocados os 295 sensores, já descritos em etapas anteriores. Na Figura 3.22 encontra-se o posicionamento desses equipamentos.

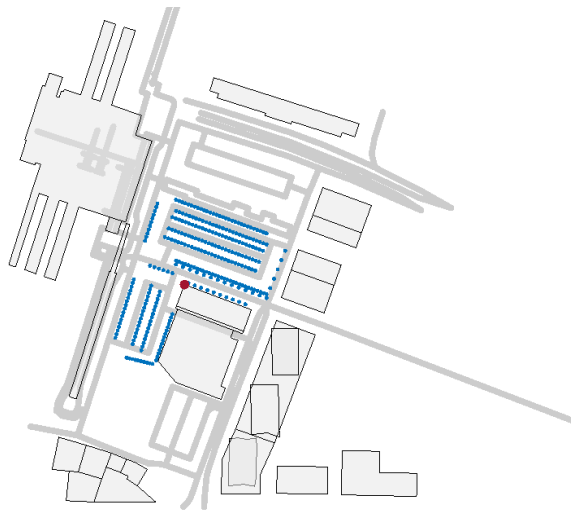


Figura 3.22 - Posicionamento da estação base e sensores SP no *Vienna 5G SL Simulator*.

Capítulo 4 - Resultados de Simulação da Rede

Neste capítulo será descrito o processo de obtenção dos resultados com cada uma das ferramentas de simulação, terminando com a análise dos resultados obtidos nas simulações de cada cenário.

No *Radio Mobile*, o foco principal das simulações centra-se na análise do mapa de cobertura dos valores de RSRP, que é possível obter com o respetivo *threshold* que foi calculado no *link budget*, de forma a visualizar os buracos de cobertura. Uma coisa que se deve ter em conta na medição da percentagem de cobertura, é que se deve apenas considerar os valores contidos dentro da área prevista. O que acontece nestas simulações é que parte do sinal propaga-se para fora da área de interesse o que implicaria um valor de percentagem de cobertura não fidedigno. Assim, teve de se proceder à exclusão dos valores medidos fora da área desejada.

De forma a conseguir realizar isso criou-se um script em *Python* com o auxílio da biblioteca *Shapely* [64], que lê o ficheiro que contém os valores de cobertura, nomeadamente a coluna da tabela que indica as coordenadas de cada ponto, e elimina todos os pontos cujas coordenadas geográficas de latitude e longitude estejam fora da área prevista de cobertura. De forma a definir a área prevista de cobertura nesse *script*, basta apenas desenhar um objeto de polígono no *Google Earth Pro* e guardá-lo num ficheiro em formato KML, onde é possível extrair todas as coordenadas geográficas desse polígono e utilizar como referência no referido *script*.

Tendo o ficheiro filtrado apenas com os pontos dentro da área de cobertura de interesse, é possível carregá-lo como *input* no *Radio Mobile* e verificar que o processo de exclusão de pontos foi concluído com sucesso. Adicionalmente, será possível fazer uma análise fidedigna dos resultados, como a percentagem de cobertura e obtenção de outras métricas adicionais de estatística descritiva. A partir do ficheiro filtrado, é possível criar gráficos tais como CDF e histogramas para analisar os valores obtidos, e a partir da CDF é possível determinar a percentagem de cobertura podendo assim verificar se o dimensionamento da rede teve sucesso ou não.

No caso do simulador *Vienna 5G* serão extraídos os valores de *throughput*, SINR, RSRP e CQI contidos em matrizes resultantes das simulações e irão ser criados *heatmaps* e histogramas desses parâmetros de forma a ter noção da distribuição desses valores e será também feita a análise dos percentis de cada um deles.

4.1 Cenário Urbano

Tendo finalizado o planeamento das estações base urbanas, estas são transpostas para a ferramenta *Radio Mobile*. Na Figura 4.1 é possível observar o posicionamento das 50 estações urbanas.



Figura 4.1 - Posicionamento das estações base urbanas no *Radio Mobile*.

De seguida, foi iniciada a simulação de cobertura com um *threshold* de RSRP de -10 dBm a -78.5 dBm, que é o valor mínimo de RSRP ao qual se considera que haja cobertura, de acordo com os requisitos do cenário. O resultado desta simulação encontra-se na Figura 4.2.

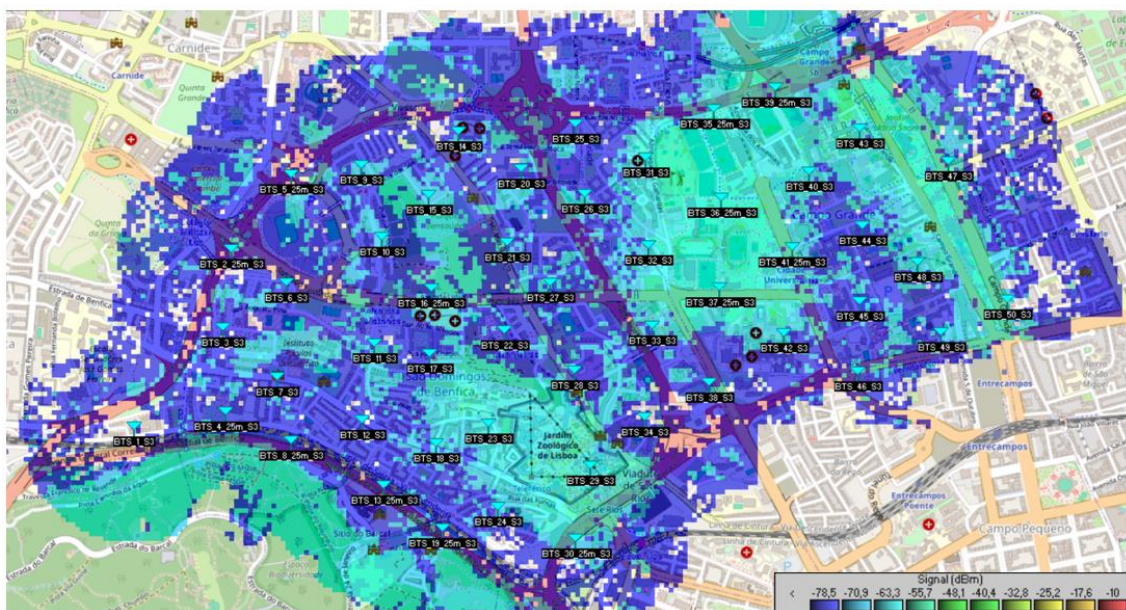


Figura 4.2 - Simulação de cobertura para o cenário urbano inicial.

Após correr a simulação, é possível observar alguns buracos de cobertura, nomeadamente na zona da “BTS_1”. A primeira solução consiste em tentar realocar estações de forma a verificar se é possível melhorar a cobertura. Após várias tentativas, não foi possível realocar nenhuma estação que trouxesse uma melhoria significativa na cobertura.

Alternativamente, optou-se por seguir o dimensionamento original da grelha, na zona onde se tinha colocado apenas a “BTS_1”, e colocar as 3 estações na forma de torre de 25 metros de altura.

Assim, foram adicionadas as estações 51, 52 e 53 e a estação 1 foi desativada, como se pode observar na Figura 4.3.

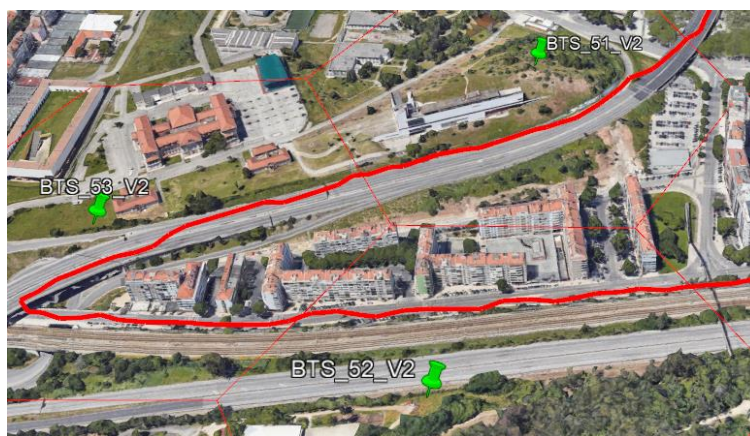


Figura 4.3 - Localização das BTS 51, 52 e 53 no cenário urbano.

Tendo aplicado estas correções, correu-se de novo a simulação de cobertura, podendo esta ser observada na Figura 4.4.

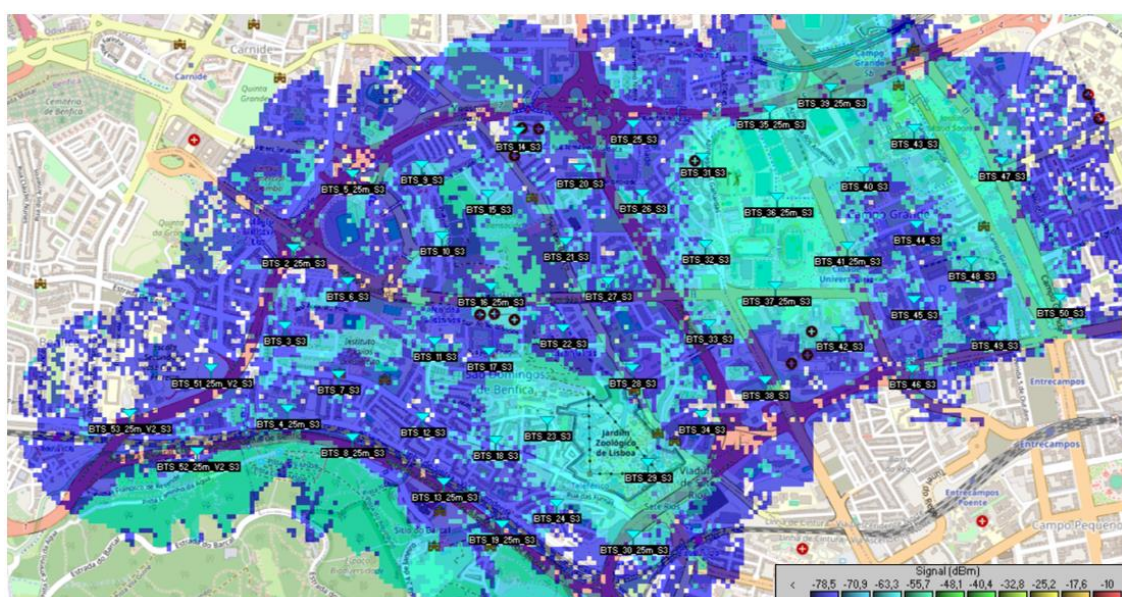


Figura 4.4 - Simulação de cobertura para o cenário urbano otimizado.

É possível concluir que houve uma melhoria na cobertura nas zonas onde se efetuou otimizações. Apesar de parte do sinal se propagar para fora da zona de interesse, não se considerou na otimização do cenário a concentração restrita do sinal nesta zona, uma vez que é possível considerar benéfico dar cobertura dentro de zonas urbanas fora da região de interesse. As únicas situações onde se pode considerar desativar algum setor, para evitar a propagação de sinal fora da zona de interesse, é quando este não é direcionado para um local onde não há benefício em garantir cobertura, como o caso de terrenos abertos e inabitados ou rios.

Tal como foi dito inicialmente, para realizar a análise da percentagem de cobertura deve-se isolar apenas os pontos dentro da área de interesse, com recurso ao *script* em *Python* já descrito. Após editar e carregar o ficheiro resultante como *input* no *Radio Mobile*, verificou-se que o processo de exclusão de pontos foi concluído com sucesso, tal como é possível visualizar na Figura 4.5.

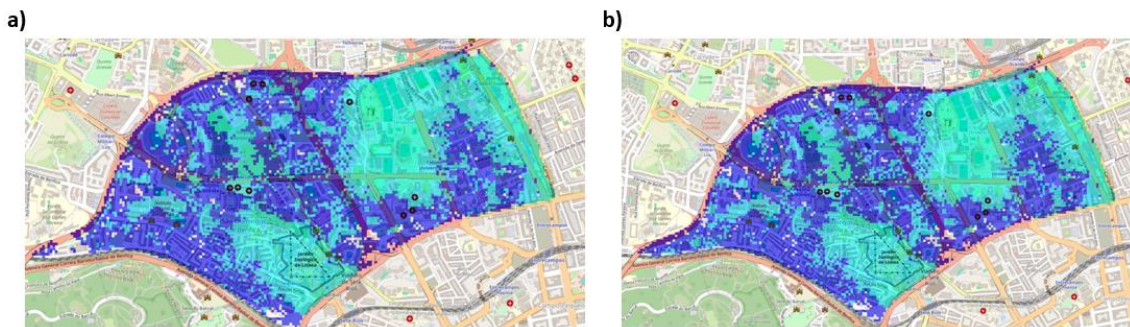


Figura 4.5 - *Cropping* da simulação de cobertura urbana: a) inicial; b) otimizada.

A partir do ficheiro final extraiu-se para gráficos de CDF os valores RSRP medidos nas simulações, podendo estes ser observados na Figura 4.6.

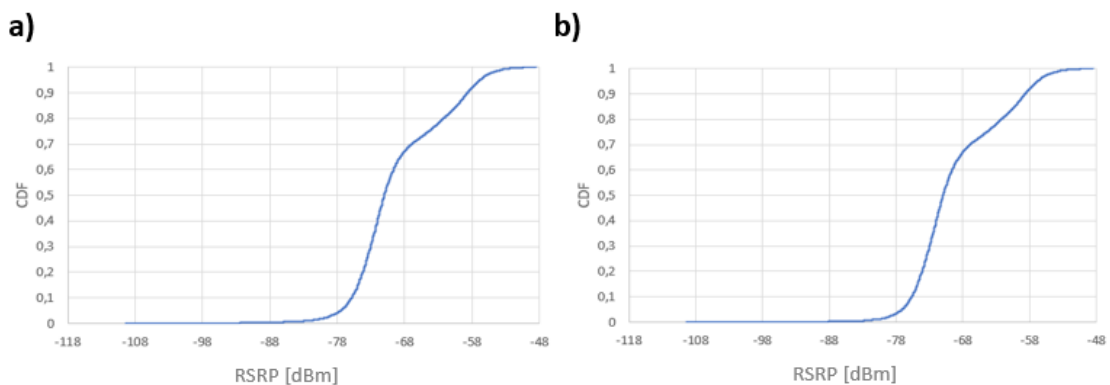


Figura 4.6 - CDF do RSRP para o cenário urbano: a) inicial; b) otimizado.

A partir dos gráficos de CDF, é possível obter uma estimativa da percentagem de pontos cujo RSRP encontra-se acima de -78.5 dBm, que representa a percentagem de cobertura indicada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Percentagem de cobertura *indoor* da simulação do cenário urbano inicial e otimizado.

	Inicial	Otimizado
% Cobertura	96.43%	97.32%

Inicialmente, observa-se que a percentagem de cobertura era de 96.43% e após aplicar as otimizações registou-se uma melhoria de 0.89% na cobertura da área.

Uma análise adicional que é possível fazer é a percentagem de cobertura *outdoor*, representado na Tabela 4.2, ou seja, se não for contabilizada a margem O2I, estar-se-ia a excluir a cobertura *indoor*, pelo que a *outdoor* passaria a ser -98.5 dBm.

Tabela 4.2 - Percentagem de cobertura *outdoor* da simulação do cenário urbano inicial e otimizado.

	Inicial	Otimizado
% Cobertura	99.90%	99.92%

É possível verificar que a cobertura *outdoor* manteve-se quase a 100%, tanto antes como depois da otimização. Assim, é possível concluir que o processo de otimização não teve efeito na cobertura *outdoor* e na *indoor*, dado que teve um aumento reduzido, com o custo adicional na implementação de 3 torres de 25 metros ao invés de colocar uma antena de 3 metros sobre um edifício numa das zonas com buraco de cobertura. Tendo em conta que o requisito de cobertura era de apenas 95%, o processo de otimização não seria necessário de implementar, dado que inicialmente esse requisito já é cumprido.

Adicionalmente, à percentagem de cobertura é possível analisar a distribuição dos valores de RSRP de forma a ter uma noção dos valores médios da qualidade do sinal, através dos histogramas representados na Figura 4.7.

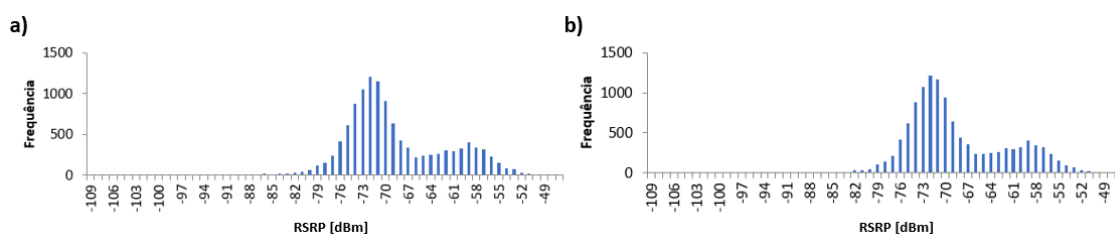


Figura 4.7 - Histograma do RSRP para o cenário urbano: a) inicial; b) otimizado.

A partir dos histogramas, é possível retirar alguns parâmetros de estatística descritiva, tais como a média, a moda e a mediana, antes e depois da otimização (ver Tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Valores de estatística descritiva para o cenário urbano.

	Inicial	Otimizado
Média [dBm]	-69.17	-69.05
Moda [dBm]	-72.10	-72.80
Mediana [dBm]	-71	-71

É possível observar que existe uma maior frequência de valores em torno dos -72.1 e -72.8 dBm antes e depois da otimização, sendo essa distribuição mais próxima do limite de sinal para cobertura *indoor*. Os valores de média e mediana também se encontram próximos desse limite. Outra conclusão que se tira é que o processo de otimização não teve muito impacto nessa distribuição de valores de RSRP.

4.2 Cenário Rural

Depois de concluir o planejamento das estações base rurais estas são transpostas para a ferramenta *Radio Mobile* e é feita a configuração dos *sites* de acordo com o que foi explicado anteriormente. Na Figura 4.8 é possível observar o posicionamento das 26 estações rurais.



Figura 4.8 - Posicionamento das estações base rurais no *Radio Mobile*.

De seguida foi iniciada a simulação de cobertura com um *threshold* de RSRP de -10 a -90.3 dBm, que é o valor mínimo de RSRP ao qual se considera que haja cobertura de acordo com os requisitos do cenário. O resultado desta simulação encontra-se na Figura 4.9.

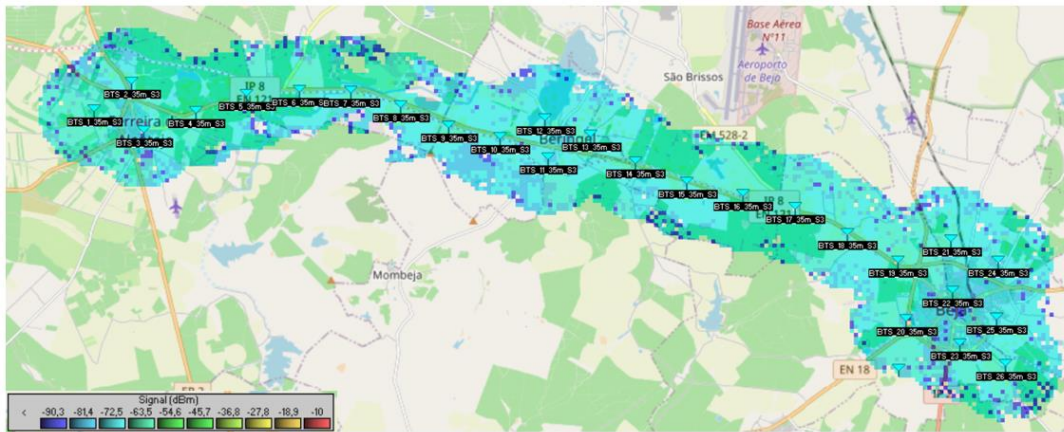


Figura 4.9 - Simulação de cobertura para o cenário rural inicial.

É possível observar que a cobertura é praticamente total, tanto nas localidades como na IP8, dado que não são visíveis quaisquer buracos de cobertura.

Neste contexto, o processo de otimização será diferente do urbano, ou seja, em vez de tentar cobrir buracos de cobertura deve-se desativar setores de forma a evitar a propagação do sinal para sítios onde não seja necessária cobertura. Os setores que se optaram por desativar foram setores de estações posicionadas nas localidades que estejam a apontar fora da direção das mesmas, e de estações na IP8 que não estejam direcionadas sobre a mesma. Na Figura 4.10 é possível observar o resultado do processo de otimização.

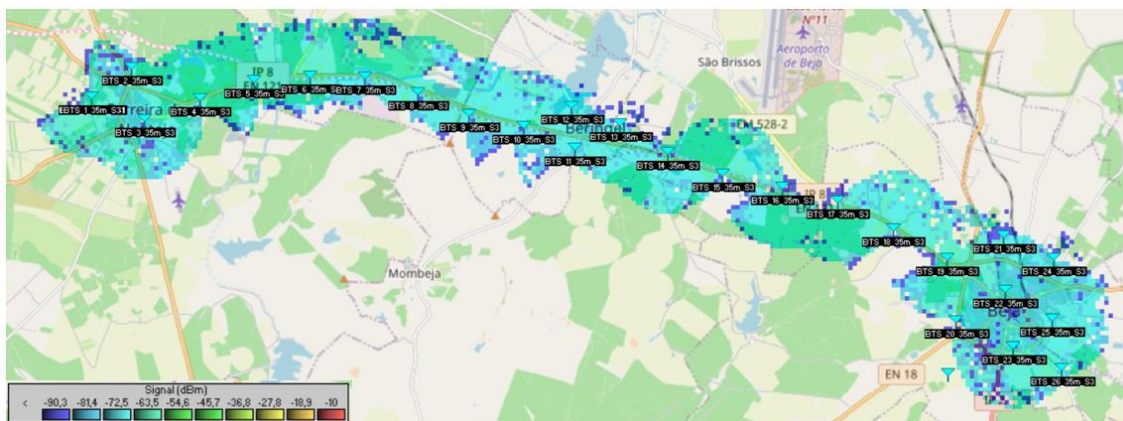


Figura 4.10 - Simulação de cobertura para o cenário rural otimizado.

É possível determinar visualmente que existe uma redução da área de cobertura nas zonas onde não existe interesse propagar o sinal. Agora, deve-se perceber se esta otimização afetou negativamente ou não as áreas de interesse. Para isso, seguiu-se o mesmo método de isolamento de zonas de interesse, sendo estas a IP8, município de Ferreira do Alentejo, Beja e Beringel. As respetivas zonas isoladas encontram-se na Figura 4.11, Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14.

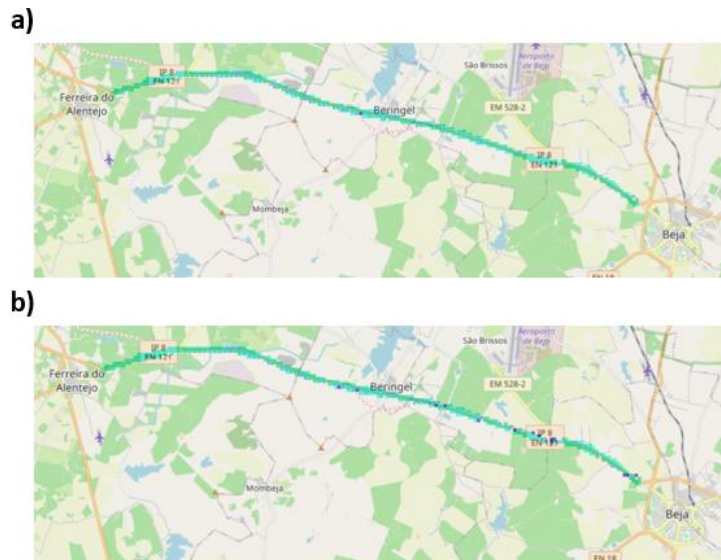


Figura 4.11 - *Cropping* da simulação de cobertura rural na IP8: a) inicial; b) otimizada.

Na zona da IP8 observa-se alguns pontos onde o sinal aparenta ter piorado, o que é expectável dado a zona delimitada ser mais estreita.

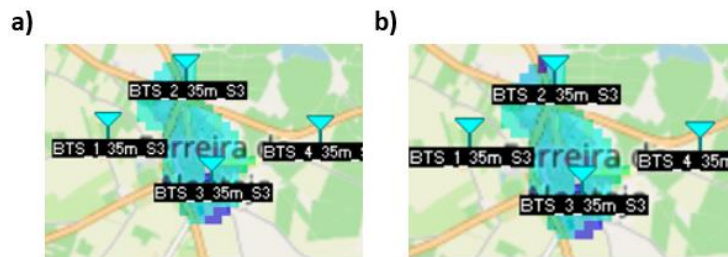


Figura 4.12 - *Cropping* da simulação de cobertura rural no município de Ferreira do Alentejo: a) inicial; b) otimizada.

O município de Ferreira do Alentejo não aparenta ter sofrido alterações.

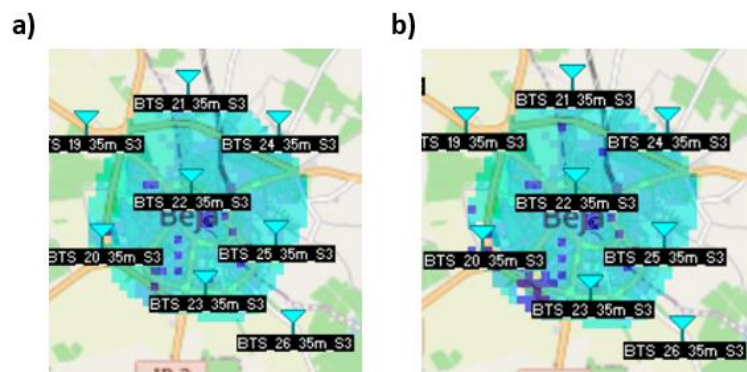


Figura 4.13 - *Cropping* da simulação de cobertura rural de Beja: a) inicial; b) otimizada.

Em Beja visualizou-se uma redução do RSRP numa zona na fronteira do *cropping*, o que pode não ser considerado muito grave dado que essa zona não será tão densificada.

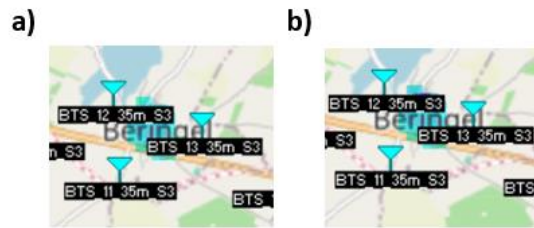


Figura 4.14 - *Cropping* da simulação de cobertura rural de Beringel: a) inicial; b) otimizada.

A zona de Beringel não aparenta ter sofrido alterações.

De seguida, é feita uma análise dos valores numéricos dessas zonas, tendo-se criado gráficos de CDF do RSRP para as 3 zonas, apresentados na Figura 4.15, Figura 4.16, Figura 4.17 e Figura 4.18.

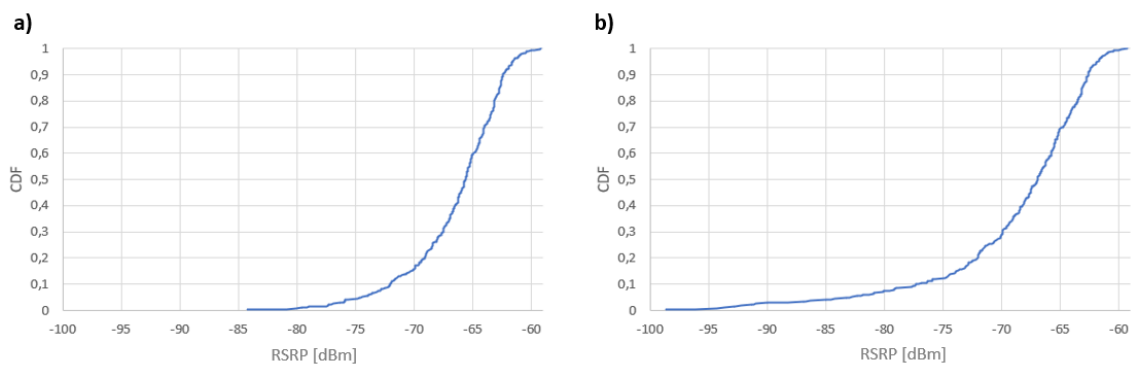


Figura 4.15 - CDF do RSRP para o cenário rural na IP8: a) inicial; b) otimizado.

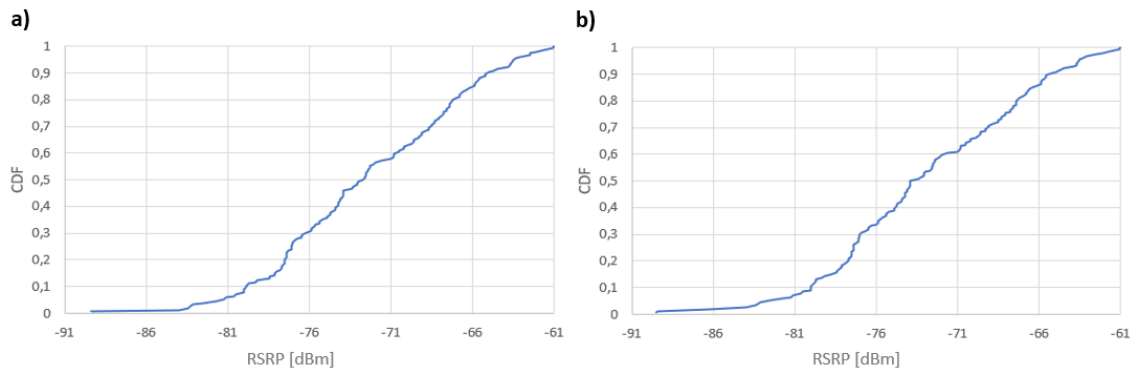


Figura 4.16 - CDF do RSRP para o cenário rural no município de Ferreira do Alentejo: a) inicial; b) otimizado.

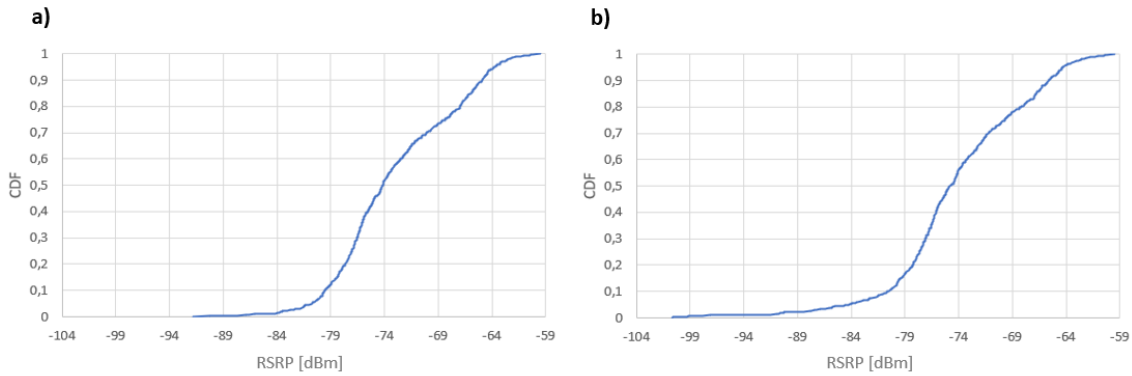


Figura 4.17 - CDF do RSRP para o cenário rural de Beja: a) inicial; b) otimizado.

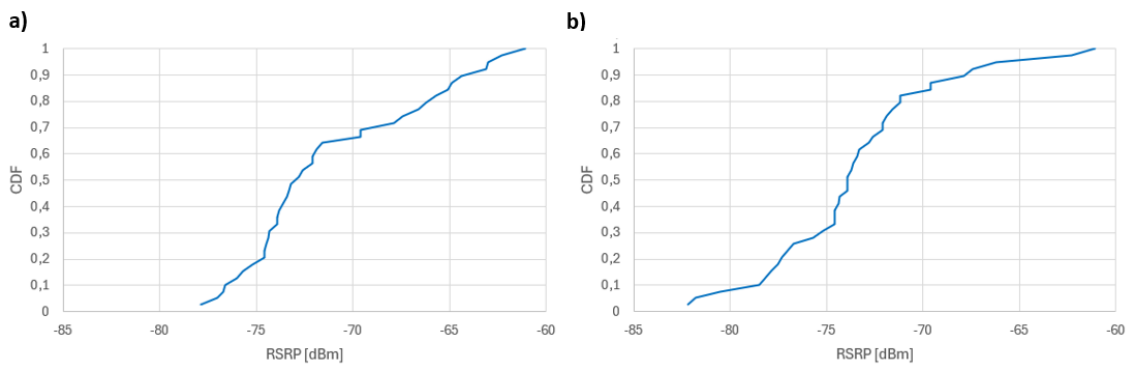


Figura 4.18 - CDF do RSRP para o cenário rural de Beringel: a) inicial; b) otimizado.

A partir destes gráficos, deduz-se a percentagem de cobertura, podendo-se observar a mesma na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Percentagem de cobertura da simulação do cenário rural inicial e otimizado.

% Cobertura	Inicial	Otimizado
IP8	100%	97.40%
Ferreira do Alentejo	100%	100%
Beja	99.68%	98.08%
Beringel	100%	100%

Tal como foi observado na análise visual das zonas isoladas, conclui-se que houve um ligeiro decréscimo na percentagem de cobertura de 2.6% e 1.6% nas zonas da IP8 e de Beja, respetivamente, e as zonas de Ferreira do Alentejo e de Beringel mantiveram-se inalteradas. Tendo em conta o que já foi dito anteriormente, e como a percentagem de cobertura cumpre o requisito mínimo de 95% nas zonas de interesse, pode-se considerar que a otimização teve sucesso se for tido em conta os recursos que é possível poupar ao desativar setores desnecessários, não indo abaixo do limite mínimo. É de notar que neste caso foram registados valores de cobertura de 100%, significando

que todas as amostras coletadas cumprem o requisito mínimo de cobertura, no entanto no contexto real de cobertura não é possível garantir sempre uma cobertura a 100%, devido a fenômenos de desvanecimento ou variação de sinal. Apesar de a IP8, Ferreira do Alentejo e Beringel registarem 100% de probabilidade de cobertura, é possível que eventualmente haja falhas de cobertura nessas zonas.

De seguida, procede-se à análise da distribuição dos valores de RSRP de forma a ter uma noção dos valores médios da qualidade do sinal, através dos histogramas representados na Figura 4.19, Figura 4.20, Figura 4.21 e Figura 4.22 para cada uma das zonas de interesse.

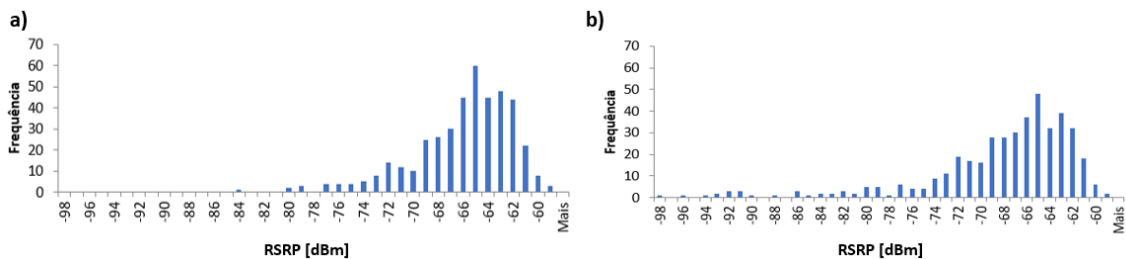


Figura 4.19 - Histograma do RSRP para o cenário rural na IP8: a) inicial; b) otimizado.

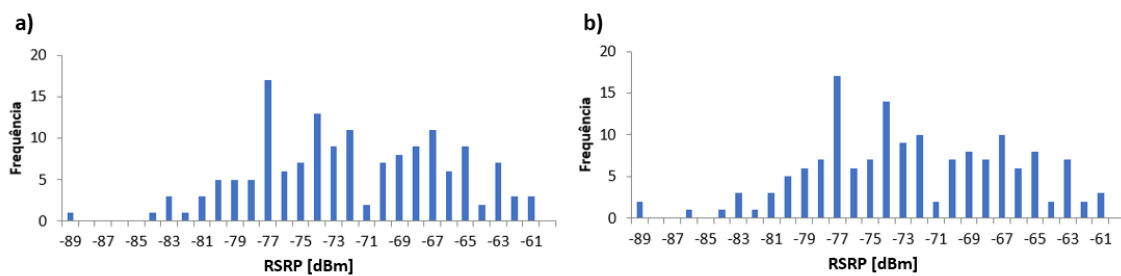


Figura 4.20 - Histograma do RSRP para o cenário rural no município de Ferreira do Alentejo: a) inicial; b) otimizado.

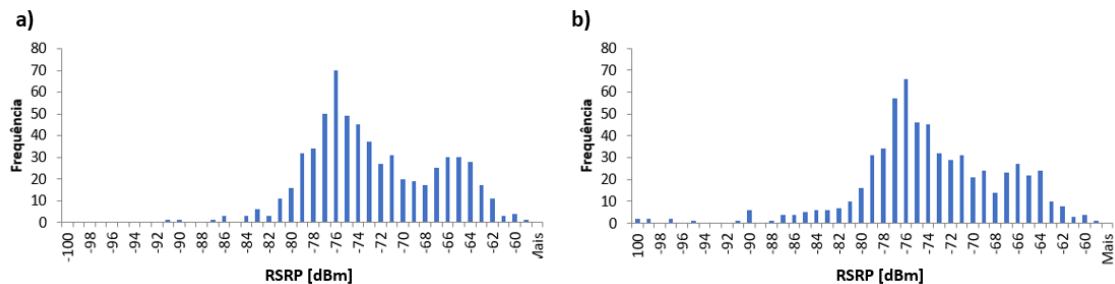


Figura 4.21 - Histograma do RSRP para o cenário rural de Beja: a) inicial; b) otimizado.

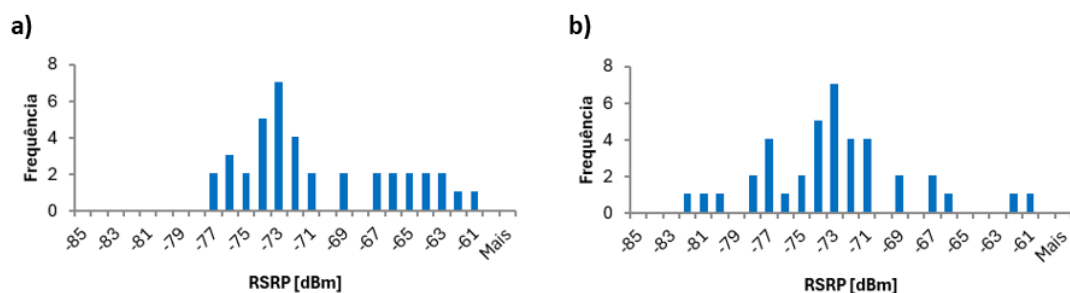


Figura 4.22 - Histograma do RSRP para o cenário rural de Beringel: a) inicial; b) otimizado.

A partir dos histogramas é possível retirar os mesmos parâmetros de estatística que o cenário urbano, sendo estes a média, a moda e mediana, antes e depois da otimização, representados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Valores de estatística descritiva para o cenário rural.

	Inicial			Otimizado		
	Média [dBm]	Moda [dBm]	Mediana [dBm]	Média [dBm]	Moda [dBm]	Mediana [dBm]
IP8	-66.44	-63.20	-65.60	-68.69	-63.20	-66.90
Ferreira do Alentejo	-72.42	-77.40	-72.65	-72.96	-77.40	-73.65
Beja	-73.08	-76.80	-74.20	-74.17	-76.60	-74.80
Beringel	-71.09	-74.60	-72.80	-73.49	-74.60	-73.90

Observando os valores, conclui-se que o valor médio e mediano do RSRP diminuiu, o que faz sentido, dado que o mesmo foi observado na redução da percentagem de cobertura destas zonas, sendo Ferreira do Alentejo a zona com menor redução. É de acrescentar que na IP8 os valores de RSRP tendem a ser mais altos, dado que esta é uma estrada numa zona rural onde não existem tantas obstruções, quando comparado com a presença de habitações nas outras duas localidades.

4.3 Cenário HST

Depois de concluir o planeamento das estações base, estas são transpostas para a ferramenta *Radio Mobile* e é feita a configuração dos *sites* de acordo com o que foi dimensionado. Na Figura 4.23 é possível observar o posicionamento das 39 estações HST.

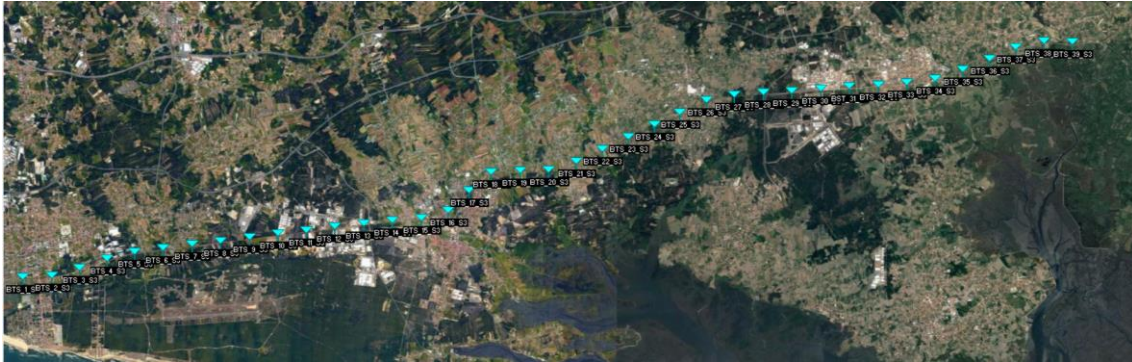


Figura 4.23 - Posicionamento das estações base HST no *Radio Mobile*.

Nesta simulação serão apenas usados dois setores, que são os setores com ângulo de azimute de 60° e 300° , sendo que o de 180° irá ser desativado dado que este não aponta numa direção útil.

Uma coisa que é preciso ter em conta quando se realiza simulações de cobertura com o *Radio Mobile* é a resolução (*Draw Size*) da simulação. Tendo em conta que a área de cobertura útil onde se pretende visualizar o sinal é muito mais restrita que a dos cenários simulados anteriormente a este, é preciso aumentar a resolução diminuindo o *Draw Size* para 1 pixel, fazendo com que o mapa de cobertura tenha a resolução máxima permitida, sendo assim possível isolar os pontos de interesse de forma mais fidedigna numa área mais reduzida. A desvantagem disto é que o tempo de simulação é substancialmente elevado fazendo com que cada simulação de cobertura HST demore cerca de 6 horas. De seguida, foi iniciada a simulação de cobertura com um *threshold* de RSRP de -10 a -55.7 dBm, que é o valor mínimo de RSRP ao qual se considera que haja cobertura, de acordo com os requisitos do cenário. O resultado desta simulação encontra-se na Figura 4.24.

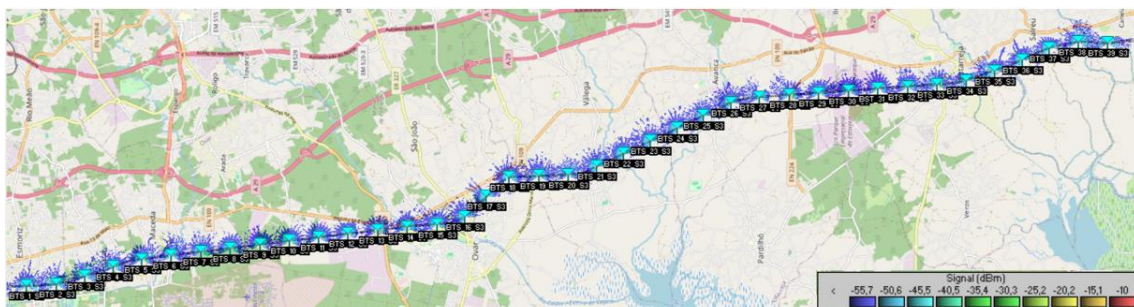


Figura 4.24 - Simulação de cobertura para o cenário HST inicial.

Analisando os resultados da simulação, é possível observar que existem pequenos buracos de cobertura na transição entre as células. De forma a otimizar esses buracos de cobertura, optou-se por aumentar a potência de transmissão de 50 para 53 dBm. Na Figura 4.25 encontram-se os resultados da cobertura otimizada.

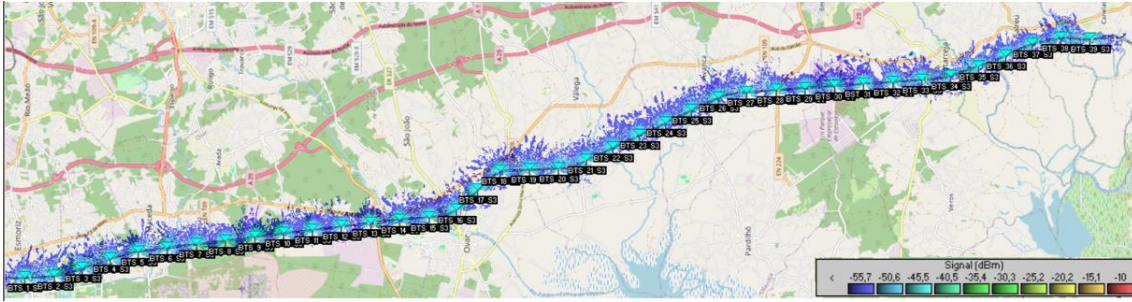


Figura 4.25 - Simulação de cobertura para o cenário HST otimizado.

Tal como esperado, parece ter havido uma redução nos buracos de cobertura pelo crescimento do raio de cobertura, via do aumento da potência de transmissão.

Da mesma forma que foi feito nos cenários anteriores, isolou-se a zona de interesse, neste caso, a linha de comboio do trajeto, de forma a extrair os seus respetivos valores de RSRP que se encontram representados nos gráficos de CDF da Figura 4.26.

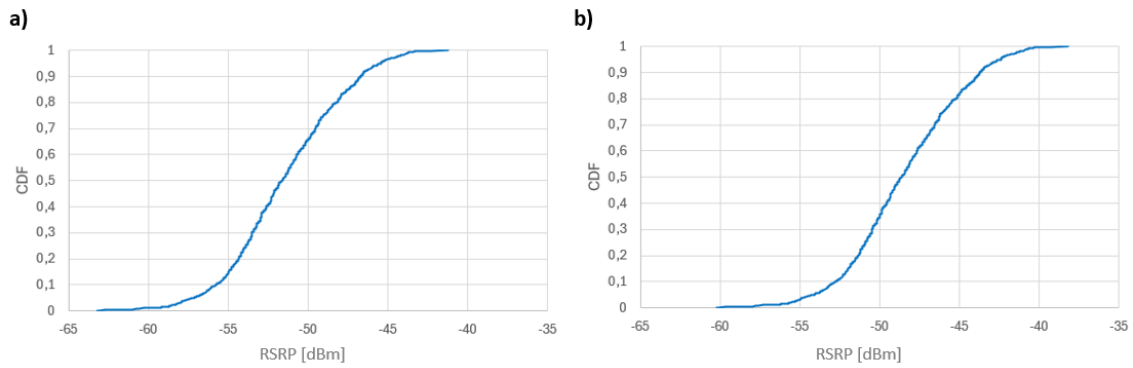


Figura 4.26 - CDF do RSRP para o cenário HST: a) inicial; b) otimizado.

A partir destes gráficos, obteve-se a percentagem de cobertura inicial e otimizada apresentada na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Percentagem de cobertura da simulação do cenário HST inicial e otimizado.

	Inicial	Otimizado
% Cobertura	89.78%	98.33%

Ao aumentar a potência de transmissão, houve um aumento substancial na percentagem de cobertura de 8.65%, provando tanto visualmente como analiticamente que este cenário foi otimizado com sucesso, sendo a percentagem de cobertura final de 98.33%. Este valor considera-se satisfatório, tendo em conta que este cenário ferroviário não é considerado como uma vertente crítica da ferrovia, sendo o requisito mínimo de cobertura de 95%.

Por fim, foram retirados os histogramas dos valores de RSRP apresentados na Figura 4.27, no qual se extraiu os mesmos valores de estatística descritiva tidos como referência em cenários anteriores na Tabela 4.7.

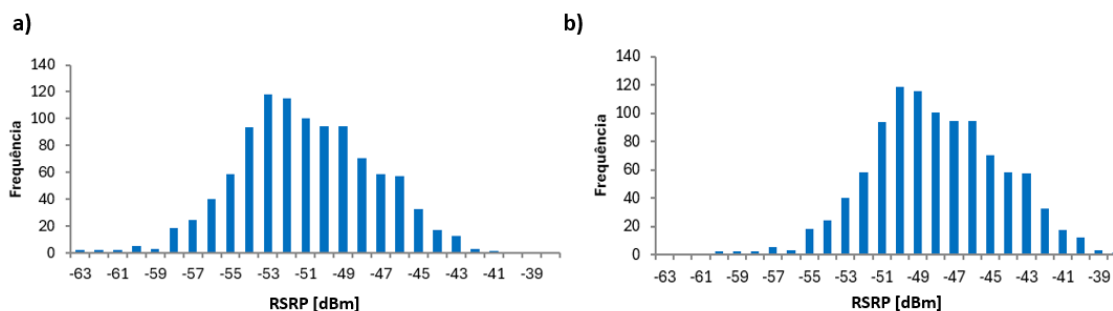


Figura 4.27 - Histograma do RSRP para o cenário HST: a) inicial; b) otimizado.

Tabela 4.7 - Valores de estatística descritiva para o cenário HST.

	Inicial	Otimizado
Média [dBm]	-51.46	-48.46
Moda [dBm]	-52.30	-49.30
Mediana [dBm]	-51.60	-48.60

Observando o histograma e as métricas referidas, é possível ver que há uma maior concentração de valores de RSRP nos limites de sinal a -55.7 dBm, tendo em conta o valor da moda. Os valores de sinal médio e mediano tendem a ser próximos desta. Para além disso, nota-se que o aumento de todas estas métricas é de 3 dB, que corresponde ao mesmo aumento aplicado na potência de transmissão durante o processo de otimização.

4.4 Cenário SSL

Tendo finalizado o planeamento das estações base para o cenário SSL, estas são transpostas para a ferramenta *Radio Mobile* e é realizada a configuração dos sites. Na Figura 4.28 é possível observar o posicionamento das 6 estações SSL.

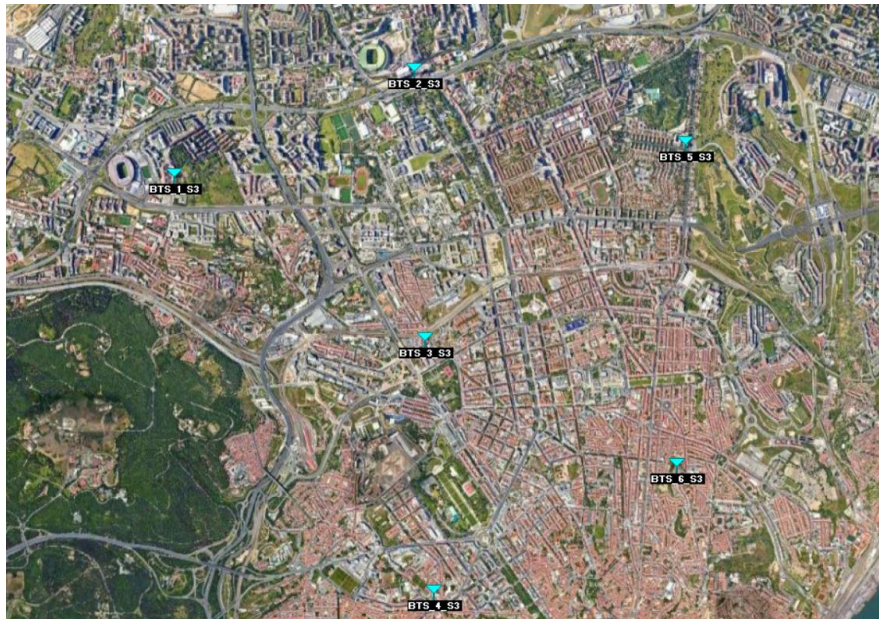


Figura 4.28 - Posicionamento das estações base SSL no *Radio Mobile*.

De seguida, foi iniciada a simulação de cobertura com um *threshold* de RSRP de -10 dBm a -85.3 dBm, que é o valor mínimo de RSRP ao qual se considera que haja cobertura, de acordo com os requisitos do cenário. O resultado desta simulação encontra-se na Figura 4.29.

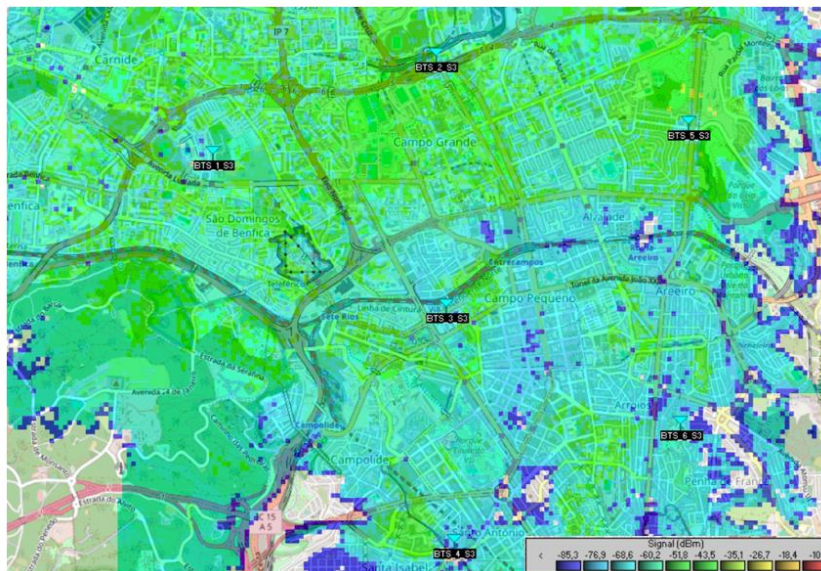


Figura 4.29 - Simulação de cobertura para o cenário SSL inicial.

É possível observar que existem dois buracos de cobertura, um a Sul da “BTS_5” e outro significativamente a Norte da “BTS_4”. De forma a garantir uma cobertura superior a 99%, optou-se por realocar a “BTS_4” para outro prédio alto mais próximo do buraco de cobertura para facilitar a cobertura nessa zona, sendo a nova estação designada por “BTS_4_V2”. Este processo de realocação encontra-se na Figura 4.30.



Figura 4.30 - Realocação da BTS_4 no cenário SSL.

Tendo aplicado esta correção, correu-se de novo a simulação de cobertura, podendo esta ser observada na Figura 4.31.



Figura 4.31 - Simulação de cobertura para o cenário SSL otimizado.

Após realocar a “BTS_4”, observa-se uma melhoria substancial nesse buraco de cobertura. Tal como no cenário urbano, existe propagação do sinal para fora da área de interesse, no qual não foi considerado benéfico desativar setores para restringir a cobertura. Assim, quando se pretender estender a implementação de SSL fora da zona de interesse, será possível tirar proveito da cobertura adicional fornecida por estas estações base. De seguida, deve-se validar se a percentagem de cobertura é de facto acima de 99%, através do método de isolamento de zonas de interesse usado nos casos anteriores. Na Figura 4.32 encontra-se o isolamento da área de cobertura para o cenário SSL.

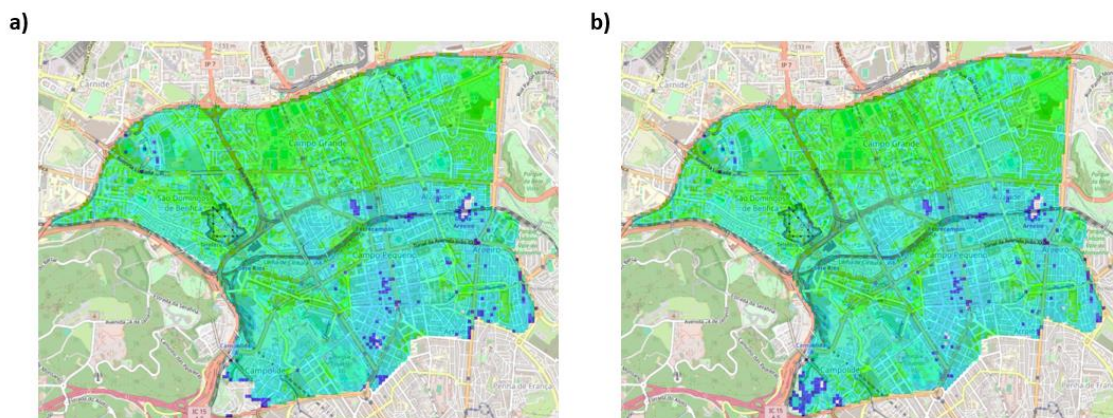


Figura 4.32 - *Cropping* da simulação de cobertura SSL: a) inicial; b) otimizada.

Após isolar a área de interesse criou-se os gráficos de CDF, representados na Figura 4.33 de forma a ser possível analisar as percentagens de cobertura para o *threshold* de RSRP de -85.3 dBm que se encontram na Tabela 4.8.

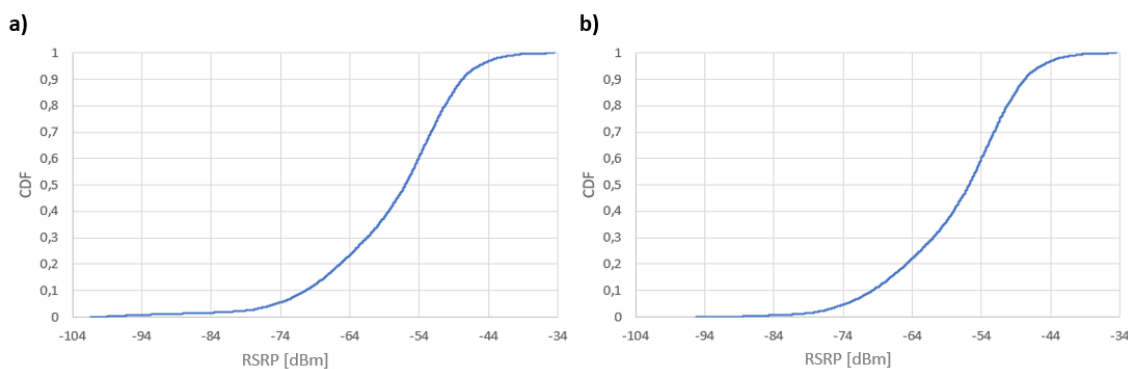


Figura 4.33 - CDF do RSRP para o cenário SSL: a) inicial; b) otimizado.

Tabela 4.8 - Percentagem de cobertura da simulação do cenário SSL inicial e otimizado.

	Inicial	Otimizado
% Cobertura	98.43%	99.55%

Antes de realocar a “BTS_4”, a percentagem de cobertura era de apenas 98.43%. Apesar de este valor ser elevado num cenário normal, num cenário de cobertura para *Smart Cities* este valor não seria suficiente, tendo este de ser pelo menos 99%. Após realocar a referida BTS, a percentagem de cobertura subiu para 99.55%, sendo este valor satisfatório para o cenário em causa.

Adicionalmente à percentagem de cobertura, é possível analisar a distribuição dos valores de RSRP, de forma a ter uma noção dos valores médios da qualidade do sinal, através dos histogramas representados na Figura 4.34.

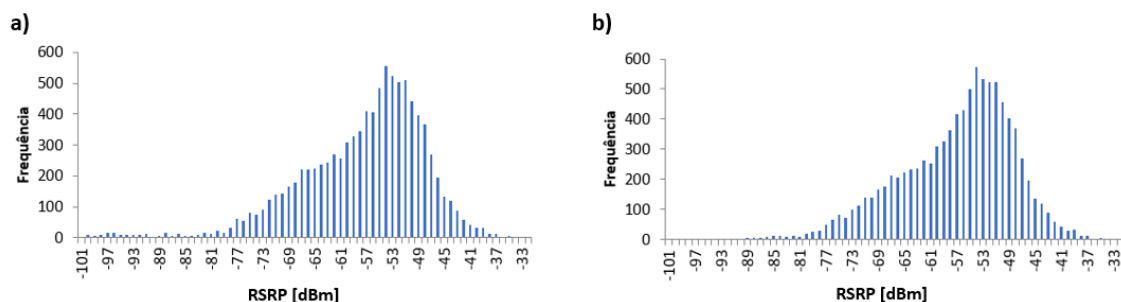


Figura 4.34 - Histograma do RSRP para o cenário SSL: a) inicial; b) otimizado.

A partir dos histogramas, é possível retirar alguns parâmetros de estatística, tais como a média, a moda e mediana, antes e depois da otimização, tal como se pode observar na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Valores de estatística descritiva para o cenário SSL.

	Inicial	Otimizado
Média [dBm]	-57.93	-57.44
Moda [dBm]	-53.50	-53.50
Mediana [dBm]	-56.00	-55.80

Analisando os valores da média e mediana, é possível verificar que houve uma melhoria ligeira, sendo esta menos notável na mediana dado que, pela observação dos histogramas, a principal melhoria se observa nos valores de RSRP mais baixos, ao qual a mediana é menos influenciável por estes.

4.5 Cenário SP

Tendo concluído o posicionamento dos equipamentos, será feita a análise dos valores de RSRP e *throughput* no cenário dimensionado, para as frequências de 28 GHz e 3.5 GHz, em LOS e NLOS, de forma a testar o desempenho nestas frequências e validar qual seria a frequência mais correta a utilizar. É importante que ambos os requisitos sejam cumpridos tanto em LOS como em NLOS, uma vez que estes sensores, estando no chão, serão garantidamente obstruídos quando um veículo ocupar o respetivo lugar de estacionamento. A simulação da propagação do sinal é definida através do modelo de propagação escolhido dentro das opções disponibilizadas pelo simulador, tendo sido escolhido, neste caso, o modelo *3GPP UMi*, nas versões LOS, para simular linha de vista, e NLOS, quando se pretende assumir que não há linha de vista.

4.5.1 Faixa dos 28 GHz

Após correr as simulações para o cenário SP utilizando a frequência de 28 GHz em LOS e NLOS, é preciso determinar se é possível garantir cobertura com uma frequência na faixa das ondas milimétricas. Assim, tal como nos outros cenários, irá ser analisado o RSRP, agora na forma de um *heatmap*, que se encontra na Figura 4.35.

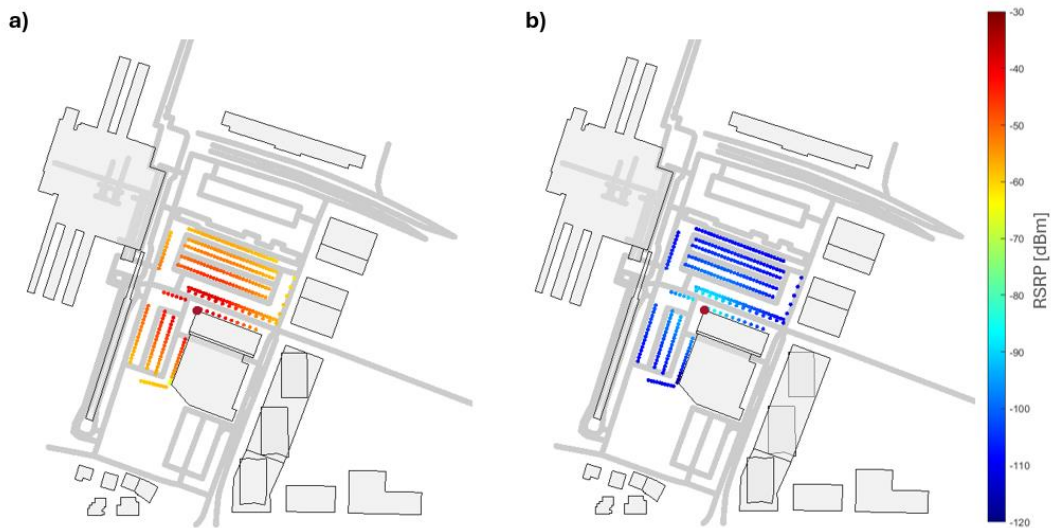


Figura 4.35 – *Heatmap* do RSRP para o cenário SP 28 GHz: a) LOS; b) NLOS.

É possível observar que, tanto em LOS como em NLOS, o RSRP tende a diminuir com a distância dos sensores em relação à estação base. Para além disso, existe uma grande diminuição dos valores de RSRP quando deixa de haver linha de vista. De forma a ter uma melhor noção da distribuição dos valores de RSRP, fez-se o histograma dos mesmos que se encontra na Figura 4.36.

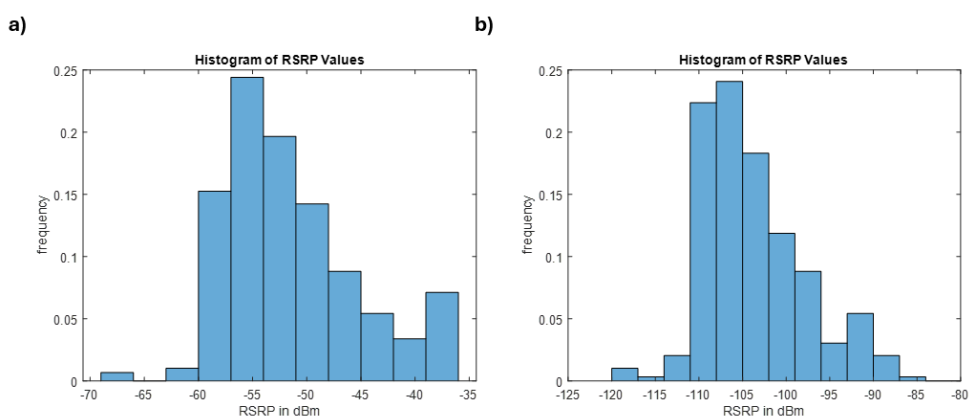


Figura 4.36 - Histograma do RSRP para o cenário SP 28 GHz: a) LOS; b) NLOS.

Ao analisar os valores do histograma, conclui-se que existem vários valores abaixo do limiar de RSRP de -91.82 dBm quando deixa de haver linha de vista, o que indica que, neste caso, vários sensores não têm nível de sinal suficiente. Adicionalmente,

observando os percentis do RSRP (Tabela 4.10), é possível notar que, até ao percentil 50, os sensores em NLOS continuam a não cumprir os requisitos de cobertura.

Tabela 4.10 - Percentis do RSRP para o cenário SP 28 GHz.

RSRP [dBm]	LOS	NLOS
5º percentil	-58.98	-110.61
50º percentil	-52.75	-104.93
95º percentil	-38.98	-91.09

De forma a perceber quantos sensores não possuem nível de sinal suficiente e a localização destes, fez-se um *plot* dos sensores com cor verde para os que cumprem o requisito e vermelho para os que não cumprem, que se encontra na Figura 4.37.

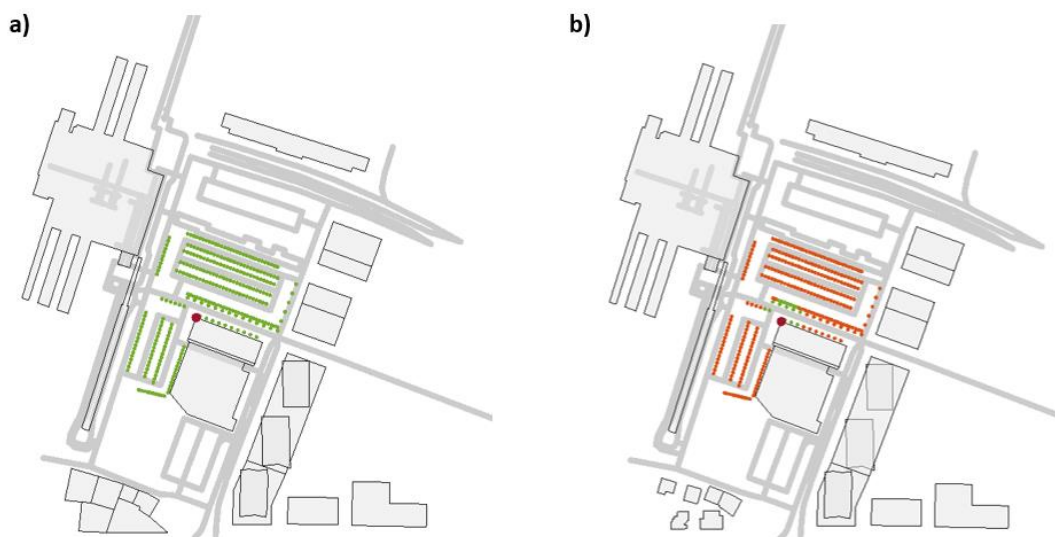


Figura 4.37 – Cumprimento do *Threshold* de RSRP mínimo de -91.82 dBm para o cenário SP 28 GHz: a) LOS; b) NLOS.

Ao observar este *plot*, conclui-se que em LOS todos os sensores têm cobertura, mas em NLOS, dos 295 sensores, 278 não cumprem o requisito de RSRP pretendido, totalizando 94.2% dos equipamentos. Os 17 sensores que cumprem o requisito em NLOS são os que se encontram mais próximos da estação base. A conclusão que é possível retirar é que a frequência dos 28 GHz não é viável neste cenário com os requisitos no qual foi dimensionado, uma vez que o sinal sofre bastantes perdas quando não se encontra em linha de vista, o que aconteceria geralmente caso um veículo pretenda efetuar a manobra de estacionamento.

De forma a tentar otimizar este cenário, optou-se por aumentar a potência de transmissão para 46, 53 e 55 dBm para ver se é possível garantir que todos os sensores tenham cobertura suficiente. Na Figura 4.38 encontra-se os resultados dessa tentativa de otimização.

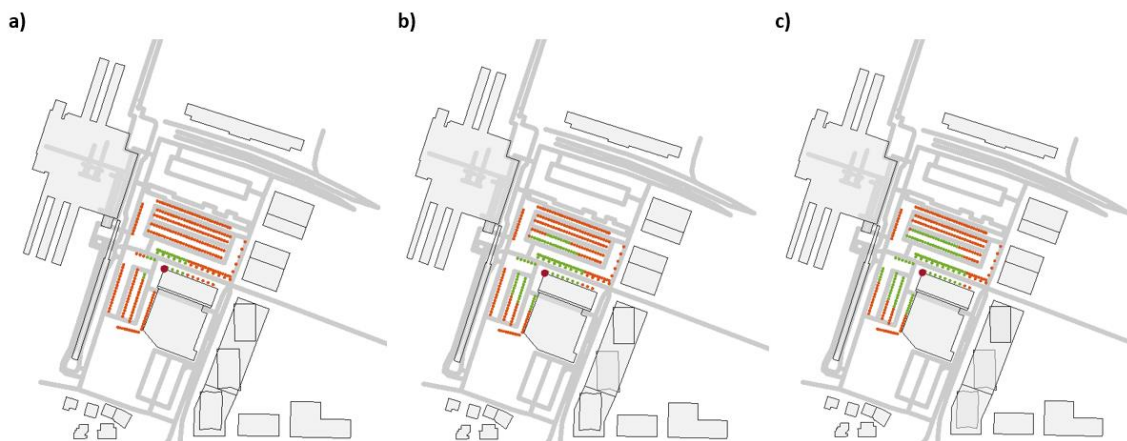


Figura 4.38 – Cumprimento do *Threshold* de RSRP mínimo de -91.82 dBm para o cenário SP 28 GHz NLOS com potência de transmissão de: a) 46 dBm; b) 53 dBm; c) 55 dBm.

Ao aumentar a potência, existem mais sensores com força de sinal recebido suficiente, no entanto, mesmo que se aumente a potência até 55 dBm, não é possível garantir cobertura para todos os sensores, sendo que ainda existem 175 que não conseguem cumprir o requisito mínimo de RSRP quando deixa de haver linha de vista. Na Tabela 4.11 encontra-se o número de utilizadores que não atingiram o valor mínimo de RSRP, por cada aumento de potência.

Tabela 4.11 - Número e percentagem de utilizadores que não cumprem o requisito de RSRP mínimo de -91.82 dBm para o cenário SP 28 GHz NLOS.

	46 dBm	53 dBm	55 dBm
Nº de utilizadores	267	203	175
% de utilizadores	90.5%	68.8%	59.3%

Mesmo depois da otimização, a frequência de 28 GHz continua a não ser viável para dar cobertura em NLOS a este tipo de sensores, uma vez que estes, estando num lugar de estacionamento, irão perder linha de vista assim que um veículo estacione num dos lugares, fazendo com que o sinal sofra perdas de atenuação demasiado elevadas.

4.5.2 Faixa dos 3.5 GHz

Tendo em conta que a frequência de 28 GHz não é viável neste cenário em concreto optou-se por refazer a simulação com os parâmetros originais alterando apenas a frequência para os 3.5 GHz. Na Figura 4.39 encontra-se o *heatmap* dos valores de RSRP para a nova frequência.

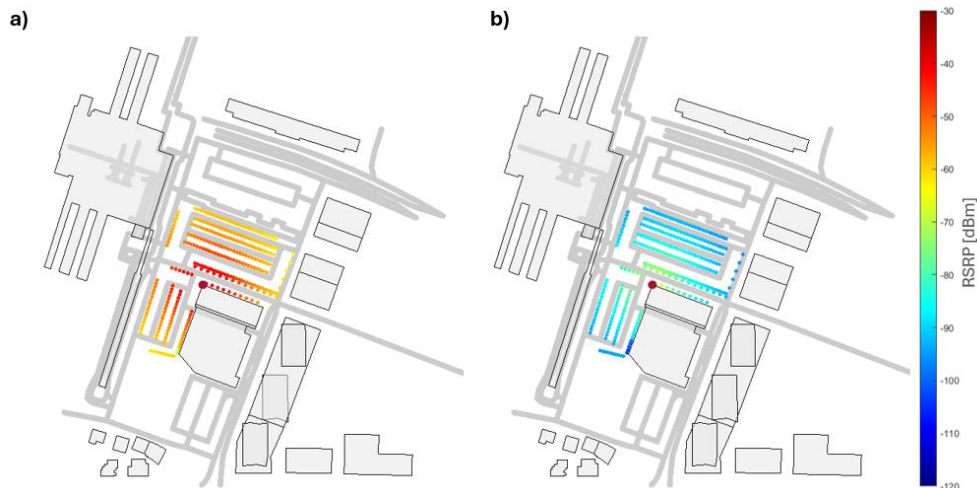


Figura 4.39 – *Heatmap* do RSRP para o cenário SP 3.5 GHz: a) LOS; b) NLOS.

Tal como se observou nas simulações com as ondas milimétricas, o RSRP tende a descer significativamente quando deixa de haver linha de vista e, ao observar os valores dos histogramas apresentados na Figura 4.40, verifica-se também que a descida dos valores de RSRP é menos significativa que a descida observada nas ondas milimétricas, provando que as ondas milimétricas estão sujeitas a maiores perdas de propagação.

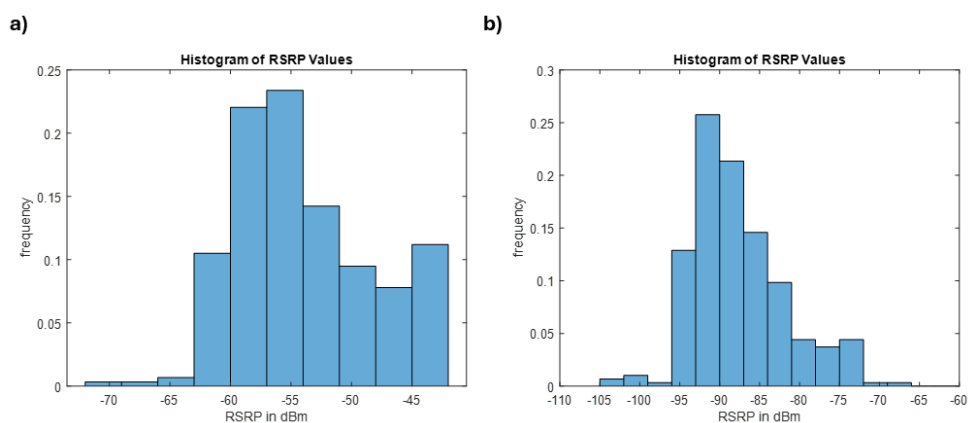


Figura 4.40 - Histograma do RSRP para o cenário SP 3.5 GHz: a) LOS; b) NLOS.

No entanto, ao observar em mais detalhe o *plot* presente na Figura 4.41 é possível observar dois sensores que não cumprem o requisito mínimo de cobertura.

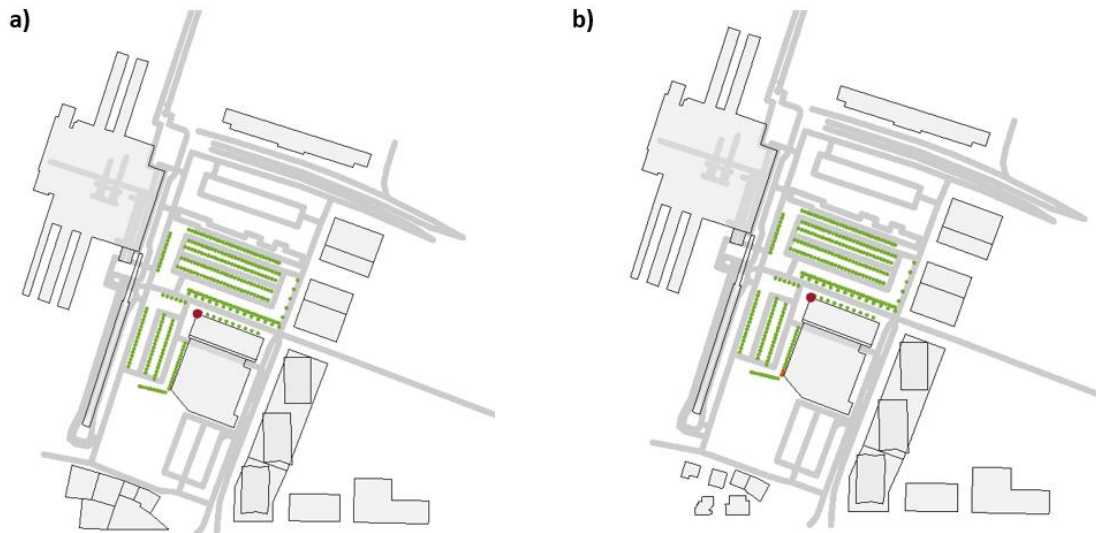


Figura 4.41 – Cumprimento do *Threshold* de RSRP mínimo de -101.87 dBm para o cenário SP 3.5 GHz: a) LOS; b) NLOS.

Apesar do número de sensores que não garante cobertura em NLOS ser substancialmente reduzido deve-se garantir que todos os sensores estejam funcionais, pelo que uma possível solução para esse problema é aumentar a potência de transmissão de 43 dBm para 46 dBm. O *heatmap* do RSRP depois dessa alteração encontra-se na Figura 4.42.

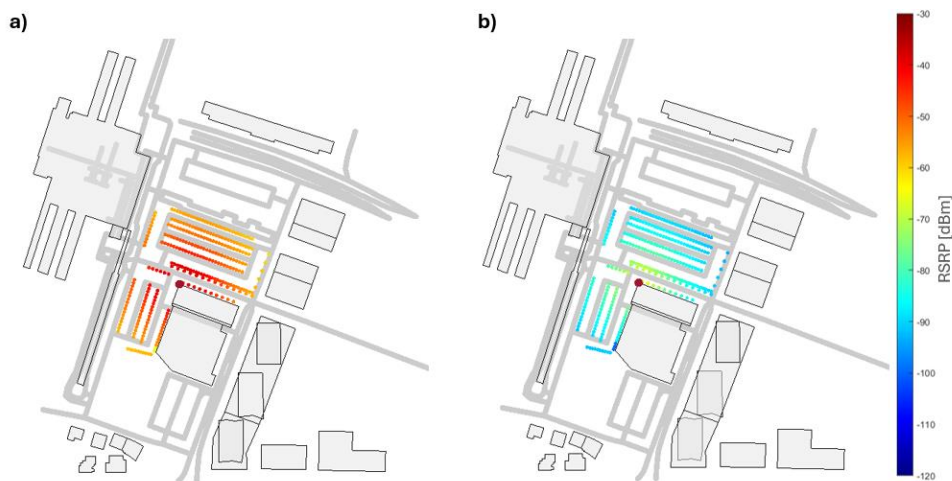


Figura 4.42 – *Heatmap* do RSRP para o cenário SP 3.5 GHz e potência de transmissão de 46 dBm: a) LOS; b) NLOS.

Ao analisar o respetivo histograma presente na Figura 4.43, é possível observar um ligeiro aumento dos valores tanto em LOS e NLOS.

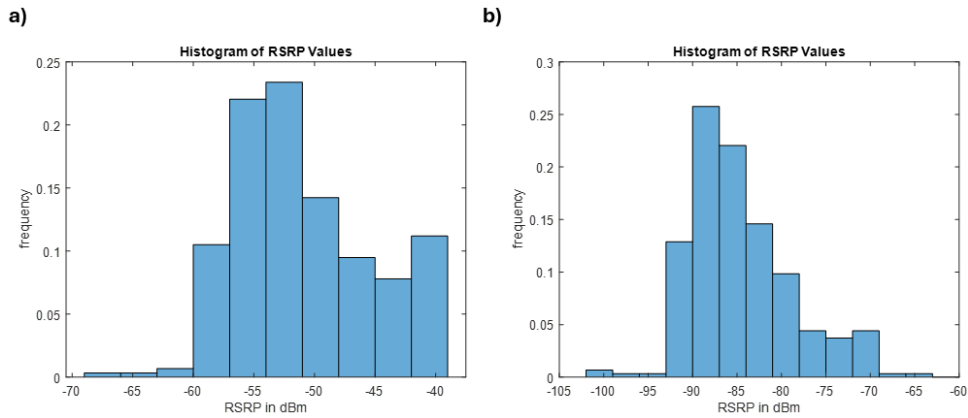


Figura 4.43 - Histograma do RSRP para o cenário SP 3.5 GHz e potência de transmissão de 46 dBm: a) LOS; b) NLOS.

É possível concluir que este aumento de potência teve sucesso uma vez que o sensor com o valor mais baixo registrado em NLOS é de -99.71 dBm. Adicionalmente, observando os percentis na Tabela 4.12, conclui-se que o RSRP em NLOS tende a ser maior na faixa de frequências dos 3.5 GHz e é possível observar um aumento nos valores de LOS e NLOS em torno de 3 dB, coincidido com o aumento de potência.

Tabela 4.12 - Percentis do RSRP para o cenário SP 3.5 GHz.

RSRP [dBm]	43 dBm		46 dBm	
	LOS	NLOS	LOS	NLOS
5º percentil	-61.19	-94.53	-58.18	-91.33
50º percentil	-54.95	-88.80	-51.94	-85.79
95º percentil	-42.08	-74.96	-39.07	-71.95

Após verificar que todos os sensores cumprem os requisitos de RSRP, agora deve-se verificar se todos atingem o valor mínimo de *throughput* de 10 kbps por cada dispositivo. Na Figura 4.44 encontra-se o *heatmap* dos valores de *throughput* medidos em cada sensor.

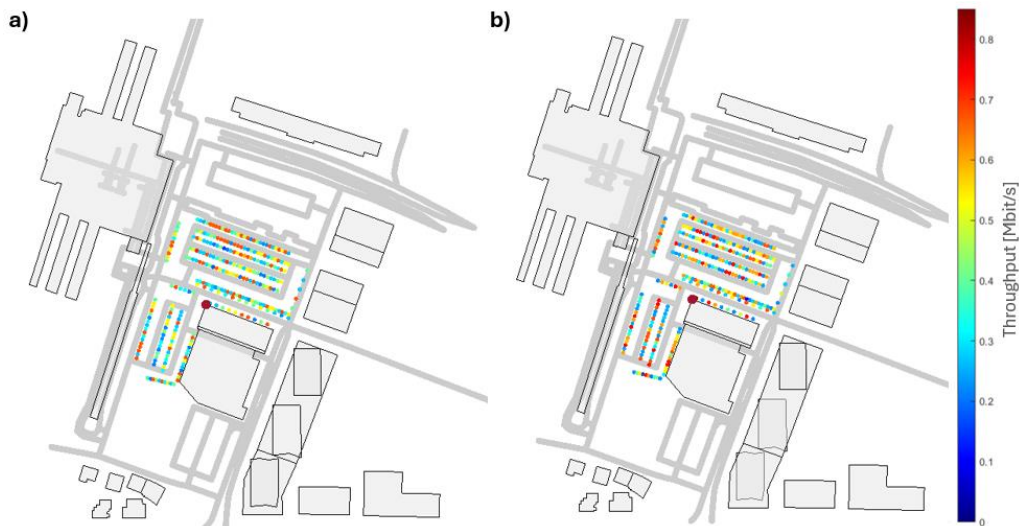


Figura 4.44 – Heatmap do *Throughput* para o cenário SP 3.5 GHz: a) LOS; b) NLOS.

Analisando diretamente os valores mínimos de *throughput*, observou-se que o sensor com o *throughput* mais baixo medido em LOS é de 149 kbps, e em NLOS 96 kbps, provando que todos os sensores cumprem os requisitos mínimos de *throughput*. Para além disso, é possível observar que os valores de *throughput* variam, registando-se um acréscimo do mesmo em alguns equipamentos. De forma a ter uma melhor noção da distribuição dos valores de *throughput*, procedeu-se à análise dos respetivos histogramas presentes na Figura 4.45.

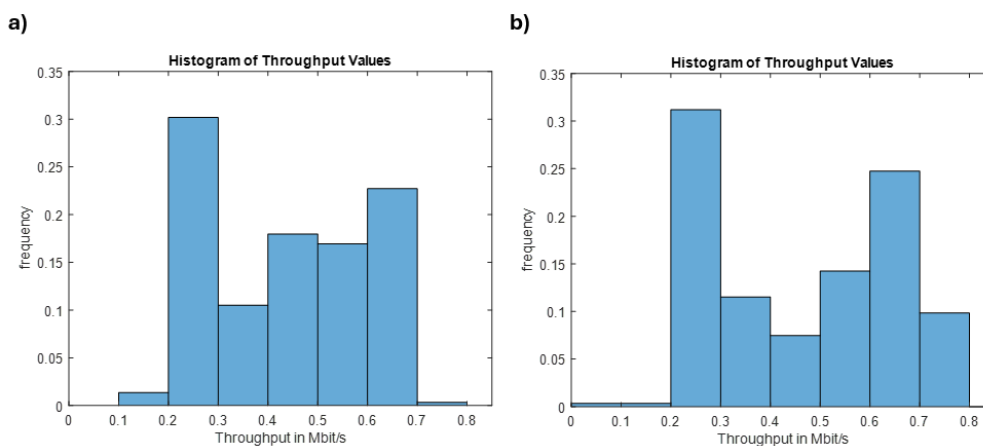


Figura 4.45 - Histograma do *Throughput* para o cenário SP 3.5 GHz: a) LOS; b) NLOS.

Parece existir uma maior distribuição de valores entre os 700 kbps e 800 kbps em NLOS, provando assim um aumento de *throughput*. Também é possível observar que alguns sensores diminuíram o valor de *throughput* em NLOS pela observação da distribuição dos valores mais baixo, que parece validar os valores numéricos dos mínimos já descritos. Ao analisar os respetivos percentis presentes na Tabela 4.13, é possível concluir que os principais percentis têm valores aproximados em LOS e NLOS.

Tabela 4.13 - Percentis do *Throughput* para o cenário SP 3.5 GHz.

<i>Throughput</i> [Mbps]	LOS	NLOS
5º percentil	0.22	0.22
50º percentil	0.41	0.49
95º percentil	0.67	0.74

Estes resultados podem parecer contraditórios com o que se esperava, pois, ao deixar de haver linha de vista, deveria ser expetável que os sensores tivessem um *throughput* mais reduzido. De forma resumida, o *throughput* depende diretamente do SINR e da largura de banda disponível. A variação do SINR irá condicionar qual o CQI atribuído, o que implica a utilização de uma determinada ordem de modulação e *coding rate*. Desta forma, considerando o número de *resource block* e a informação do CQI, é determinado o número máximo de bits transmitidos [38]. Quanto mais elevados forem o SINR e o CQI maior será o *throughput*. Assim, proceder-se-á à análise dos valores de SINR, presentes no *heatmap* da Figura 4.46.

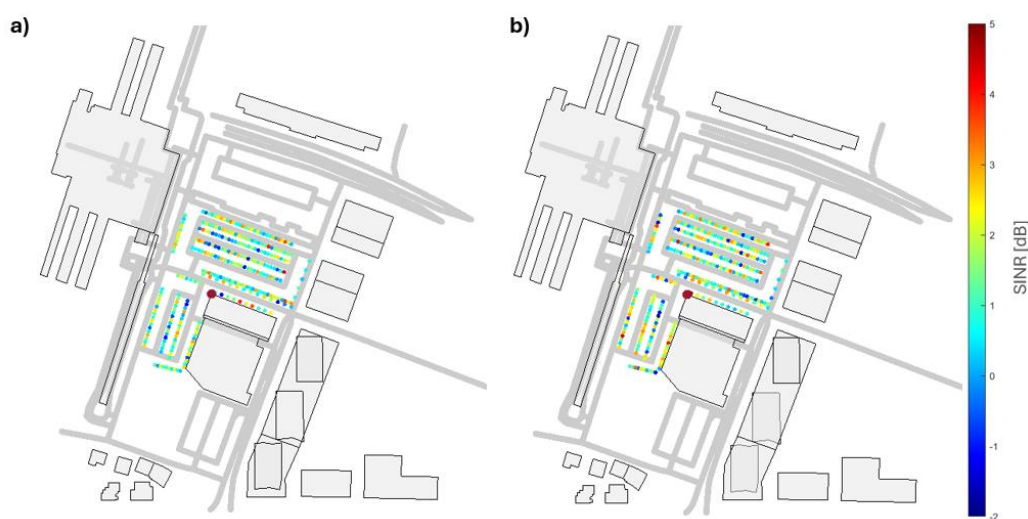


Figura 4.46 – *Heatmap* do SINR para o cenário SP 3.5 GHz: a) LOS; b) NLOS.

É possível observar um comportamento semelhante ao observado no *throughput*, onde certos sensores sofrem descidas ou subidas de SINR em NLOS. A mesma variação na distribuição dos valores observa-se na análise dos histogramas presentes na Figura 4.47 e nos percentis da Tabela 4.14.

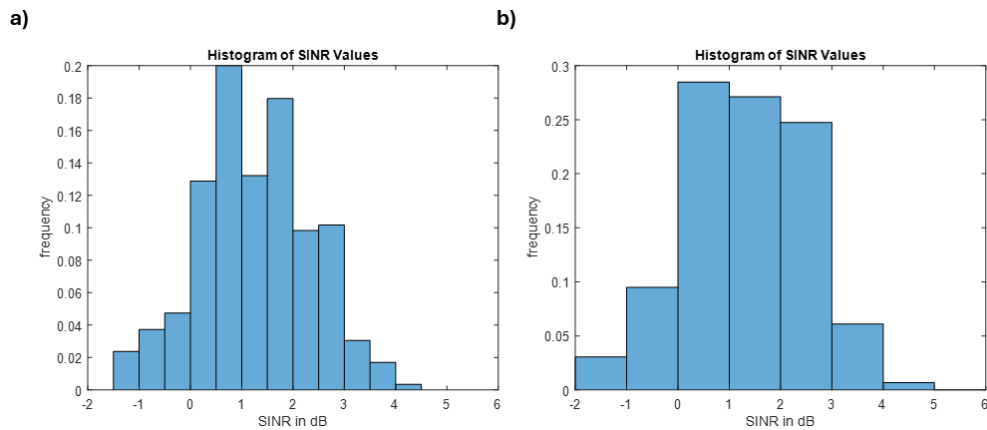


Figura 4.47 - Histograma do SINR para o cenário SP 3.5 GHz: a) LOS; b) NLOS.

Tabela 4.14 - Percentis do SINR para o cenário SP 3.5 GHz.

SINR [dB]	LOS	NLOS
5º percentil	-1.84	-1.75
50º percentil	1.22	1.46
95º percentil	3.62	3.50

Estes resultados indicam que o SINR nem sempre tende a descer quando deixa de existir linha de vista, havendo sensores onde este aumenta, o que pode ser plausível dado que a presença de obstrução irá de facto enfraquecer a força do sinal, mas também irá enfraquecer a influência da interferência, e se estes enfraquecerem na mesma proporção o SINR manter-se-á constante, ou no caso de a interferência enfraquecer mais do que o próprio sinal, o SINR poderá aumentar.

Tendo uma noção dos valores de SINR medidos, procede-se à mesma análise em relação aos valores de CQI reportados no mecanismo de feedback dos sensores, presente na Figura 4.48.

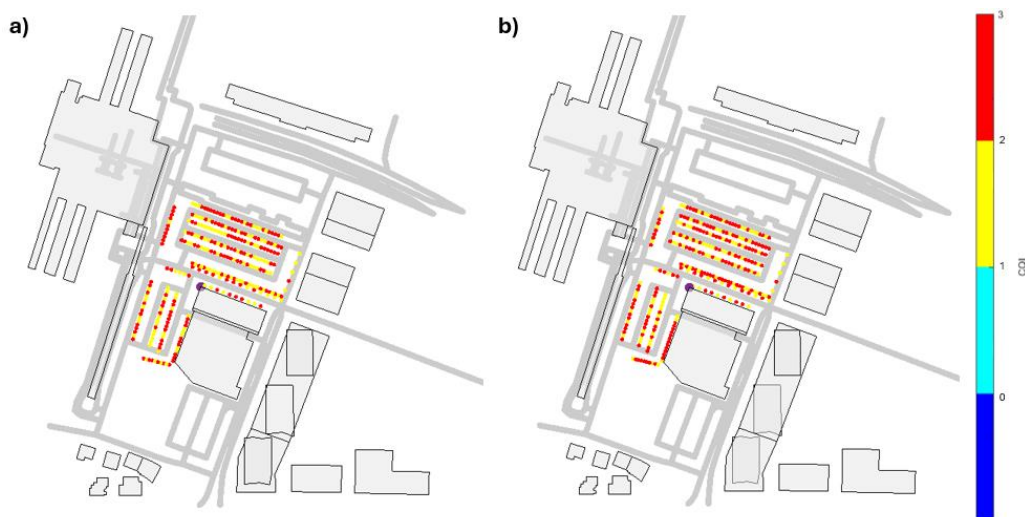


Figura 4.48 – Heatmap do CQI para o cenário SP 3.5 GHz: a) LOS; b) NLOS.

Tal como se observou nos valores de SINR, os valores de CQI tendem a variar entre LOS e NLOS, onde em alguns sensores sobe e outros desce. Os valores de modulação e *code rate* associados a cada valor de CQI, utilizados pelo simulador, encontram-se definidos na norma TS 36.213 [65].

Assim, foi possível justificar porque é que o *throughput* pode aumentar em NLOS. Outra conclusão que se retirou é que os valores de *throughput* em geral são um pouco altos em relação ao mínimo necessário, considerando assim que o sistema se encontra sobredimensionado. Uma forma mais simples de reverter isto é reduzir a largura de banda.

Neste processo de otimização, a largura de banda foi reduzida de 100 MHz para 40 MHz. Tem de se ter em conta que ao reduzir a largura de banda o *threshold* de RSRP irá mudar para -97.83 dBm. Primeiro, deve-se garantir que os requisitos de RSRP mínimos continuam a ser cumpridos através da observação do *heatmap* presente na Figura 4.49. Tal como esperado, os valores de RSRP não sofreram alterações significativas em relação à configuração original. Sendo que os requisitos de RSRP continuam a ser cumpridos com sucesso.

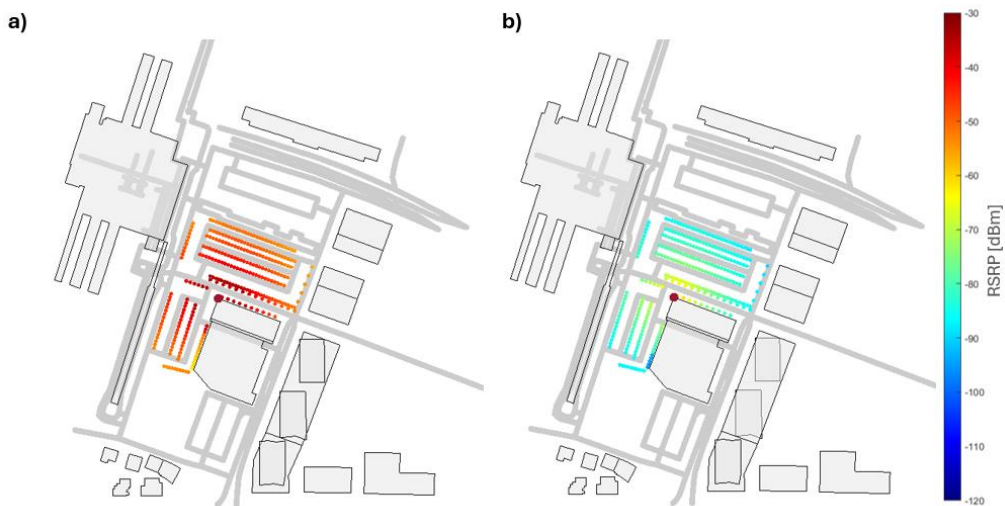


Figura 4.49 – Heatmap do RSRP para o cenário SP 3.5 GHz a 40 MHz de largura de banda: a) LOS; b) NLOS.

De seguida, ao analisar os valores de *throughput* presentes na Figura 4.50, é possível observar uma redução significativa no *throughput* tanto em LOS como em NLOS, sendo que os valores mínimos medidos em LOS e NLOS são, respetivamente, 25 kbps e 48 kbps, provando assim que o requisito continua a ser cumprido.

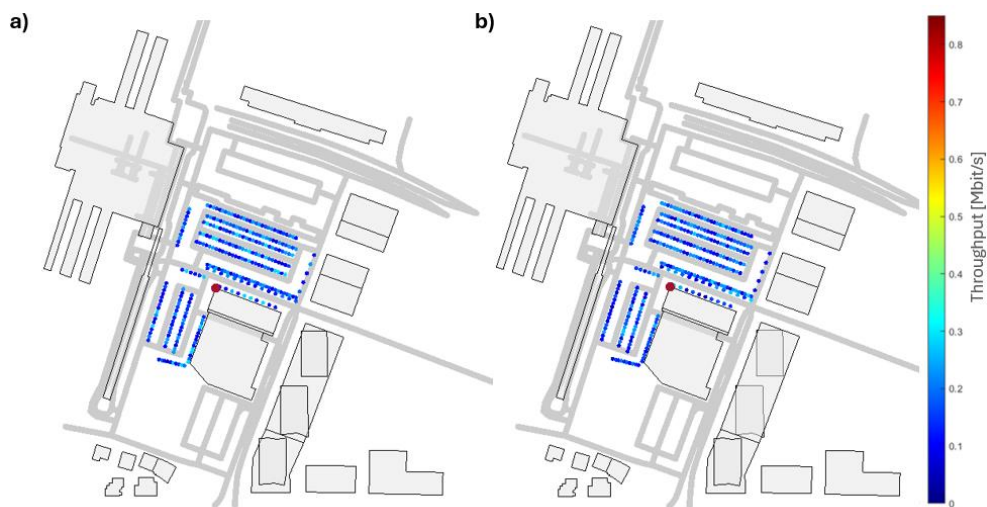


Figura 4.50 – Heatmap do *Throughput* para o cenário SP 3.5 GHz a 40 MHz de largura de banda: a) LOS; b) NLOS.

Observando em mais detalhe o histograma dos valores de *throughput*, presente na Figura 4.51, conclui-se que houve um decréscimo significativo do *throughput* tanto em LOS como em NLOS.

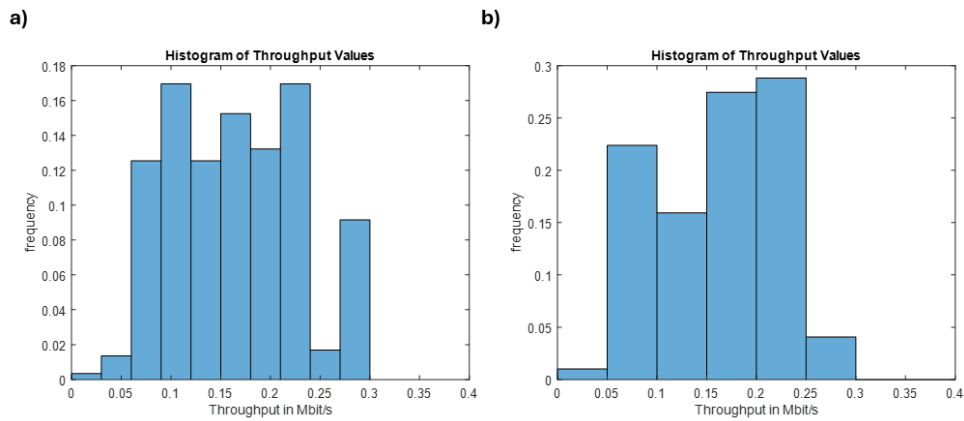


Figura 4.51 - Histograma do Throughput para o cenário SP 3.5 GHz a 40 MHz de largura de banda: a) LOS; b) NLOS.

Adicionalmente, optou-se por analisar a distribuição dos valores de SINR e CQI, que se encontram, respetivamente na Figura 4.52 e Figura 4.53, para confirmar se estes foram ou não afetados pela diminuição do valor de largura de banda.

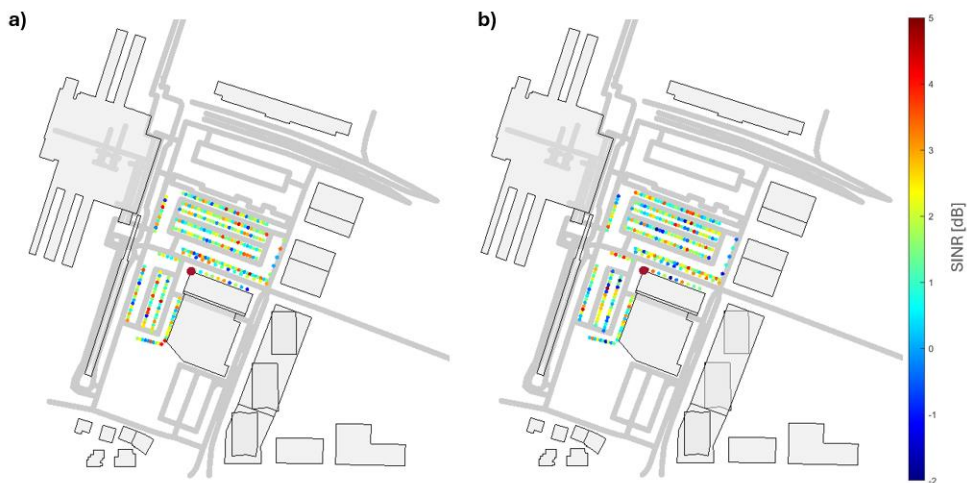


Figura 4.52 – Heatmap do SINR para o cenário SP 3.5 GHz a 40 MHz de largura de banda: a) LOS; b) NLOS.

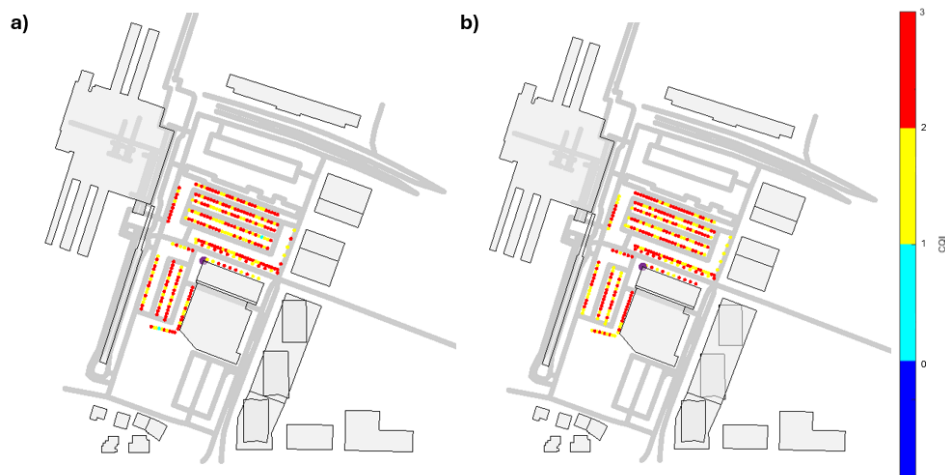


Figura 4.53 – Heatmap do CQI para o cenário SP 3.5 GHz a 40 MHz de largura de banda: a) LOS; b) NLOS.

Assim, é possível concluir que, como a distribuição dos valores de SINR e CQI são semelhantes aos valores observados na configuração original, confirma-se que não houve nenhuma alteração significativa no meio que possa influenciar o *throughput*, podendo afirmar-se que, para as mesmas condições do meio de propagação de sinal, a largura de banda teve um impacto significativo no dimensionamento do *throughput* dos sensores de estacionamento.

Na Tabela 4.15 encontram-se os percentis das métricas analisadas na otimização de largura de banda, reforçando que apenas o *throughput* sofreu alterações significativas com esta otimização.

Tabela 4.15 - Percentis do RSRP, *Throughput* e SINR para o cenário SP 3.5 GHz a 40 MHz de largura de banda.

	RSRP [dBm]		Throughput [Mbps]		SINR [dB]	
	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS
5º percentil	-54.61	-87.29	0.08	0.06	-2.58	-2.79
50º percentil	-48.13	-81.57	0.16	0.17	1.45	1.29
95º percentil	-34.85	-67.72	0.29	0.25	4.54	4.43

Após a otimização, conclui-se que foi possível corrigir o sobredimensionamento dos valores de *throughput* e, ao mesmo tempo, garantir o cumprimento dos valores de RSRP na faixa dos 3.5 GHz, provando que esta frequência é muito mais viável que a frequência dos 28 GHz no que toca a cobertura deste tipo de sensores específicos.

Capítulo 5 - Conclusões

A realização deste trabalho teve como primeiro objetivo o estudo dos conceitos teóricos relacionados com a tecnologia 5G e de redes privadas suportadas a partir desta tecnologia, alguns ambientes de simulação utilizados atualmente, bem como alguns casos de utilização e os seus respetivos requisitos de desempenho.

Partindo deste estudo, procedeu-se à execução da componente de desenvolvimento da dissertação, tendo começado com a etapa do dimensionamento que envolve a descrição e parametrização de cenários realistas. Depois, procede-se à parametrização dos cenários, tendo recorrido a referências bibliográficas adequadas, de forma a garantir o cumprimento dos requisitos de desempenho. De seguida, foram realizados os cálculos de *link budget* de forma a determinar o *pathloss*, e por sua vez, o ISD. Por fim, foi realizado o posicionamento dos equipamentos, sendo por vezes desafiante a escolha do local mais adequado.

Após as simulações com o *Radio Mobile* obtiveram-se as respetivas percentagens de cobertura para os cenários urbano, rural, HST e SSL de 96.43%, 99.92%, 89.78% e 98.43%, respetivamente. Nos cenários referentes a redes públicas os requisitos já são cumpridos, no entanto o HST e SSL encontram-se abaixo do respetivo mínimo de 95% e 99%. No cenário HST, optou-se por aumentar a potência de transmissão de 50 para 53 dBm, garantido uma cobertura final de 98.33%. No caso do SSL, foi realocada uma das estações base para ficar mais próxima do buraco de cobertura, tendo-se conseguido uma melhoria de sinal de 99.55%. Por vezes, quando a cobertura é garantida com um resultado excecional, poderá optar-se por desativar setores que estejam a cobrir zonas sem interesse, como terrenos sem qualquer infraestrutura quer habitacional quer de deslocação (estradas), como foi observado no cenário rural.

O cenário SP, simulado no *Vienna 5G*, com duas frequências distintas, 28 GHz e 3.5GHz, conduziu à simulação da intensidade de sinal em cada sensor. Nos 3.5 GHz todos os sensores cumprem o requisito mínimo, já nos 28 GHz quando deixa de haver linha de vista, 94.2% destes não tinham nível de sinal suficiente. Mesmo com o aumento de potência de transmissão, 59.3% dos sensores não tinham nível de sinal suficiente, concluindo que 28 GHz não era uma frequência viável. Ao analisar o *throughput*, é possível visualizar uma pequena discrepância nos valores em função da presença e ausência de linha de vista, onde após a análise de parâmetros adicionais como o SINR e CQI, foi possível ter uma noção do impacto conjunto da força do sinal e da interferência, que irá condicionar o ritmo de dados de cada sensor, sendo que, quando há obstrução, ambos diminuem de intensidade mas, se a interferência for mais afetada, existirá um reforço no SINR, permitindo assim que o *throughput* seja maior.

5.1 Trabalho futuro

Apesar de as ferramentas de simulação utilizadas nesta dissertação serem bastante realistas, ambas apresentam algumas limitações, nomeadamente no caso do *Radio Mobile*, com a limitação do número de métricas que é possível analisar, e no caso do *Vienna 5G*, com algumas limitações de capacidade computacional que restringem a recriação de obstruções provenientes da base de dados OSM e a utilização simultânea de parâmetros mais exigentes como valores de largura de banda elevados, e *arrays* de antena de maiores dimensões.

Como trabalho futuro, o primeiro passo seria replicar as simulações efetuadas no *Radio Mobile* com o *Vienna 5G*, ou seja, com o auxílio da base de dados OSM recriar o perfil de obstrução na área de simulação, e também replicar uma antena o mais semelhante possível à que foi utilizada no *Radio Mobile*, e fazendo finalmente uma simulação da cobertura de forma a poder realizar uma comparação direta dessa métrica, em ambos os simuladores.

Adicionalmente, seria importante utilizar o *Vienna 5G* como um complemento na análise desses cenários, e simular outras métricas adicionais como o *throughput*, SINR e CQI de forma a ter uma análise mais completa para todos os cenários estudados.

Outro ponto importante seria também simular outros cenários para outros verticais que têm ganho potencial, como o caso de estudo de agricultura inteligente, e também o desempenho dos cenários já analisados, alterando outros parâmetros de simulação, como por exemplo, diferentes configurações de antena MIMO.

Referências

- [1] Global Mobile Suppliers (GSA), “Private Mobile Networks,” 2022.
- [2] M. Sousa, A. Alves, P. Vieira, M. P. Queluz e A. Rodrigues, “Analysis and Optimization of 5G Coverage Predictions Using a Beamforming Antenna Model and Real Drive Test Measurements”. *in IEEE Access*, vol. 9, pp. 101787-101808, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3097633.
- [3] E. Teixeira, S. Sousa, F. J. Velez e J. M. Peha, “Impact of the propagation model on the capacity in small-cell networks: Comparison between the UHF/SHF and the millimeter wavebands”. *in Radio Science*, vol. 56, no. 5, pp. 1-13, May 2021, doi: 10.1029/2020RS007150.
- [4] M. A. S. F. Filho, “Analysis of the Implementation of Private Networks in 5G Using Network Slicing,” Instituto Superior Técnico, 2022.
- [5] “RF Wireless World,” [Online]. Available: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/5G-eMBB-vs-mMTC-vs-URLLC.html>. [Acedido em 22 10 2022].
- [6] M. Sauter, "From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadbands, 3rd Edition" John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-1-119-34691-3, 2017.
- [7] S. Ahmadi, "5G NR Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards", Elsevier Inc., ISBN: 978-0-08-102267-2, 2019.
- [8] P. L. Sousa, “5G-NR Network Planning: Impact of Massive MIMO and Beamforming in Coverage Predictions,” Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2020.
- [9] A. Rostami, “Private 5G Networks for Vertical Industries: Deployment and Operation Models”. *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF), Dresden, Germany, 2019*, pp. 433-439, doi: 10.1109/5GWF.2019.8911687..
- [10] ETSI 3rd Generation Partnership Project (3GPP), “ETSI TS 138 401 V16.3.0 (2020-11) 5G; NG-RAN; Architecture description; (3GPP TS 38.401 version 16.3.0 Release 16)”.
- [11] S. A. P. Domingues, “Analysis of the Performance of Multi-Access Edge Computing Network Slicing in 5G,” Instituto Superior Técnico, Lisboa, Novembro 2019.
- [12] S. Pratschner, B. Tahir, L. Marijanovic, M. Mussbah, K. Kirev, R. Nissel, S. Schwarz e M. Rupp, “Versatile mobile communications simulation: the Vienna 5G

- Link Level Simulator”.*EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2018, 226 (2018). <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1239-6>.
- [13] A. A. Zaidi, R. Baldemair, V. Molés-Cases, N. He, K. Werner e A. Cedergren, “OFDM Numerology Design for 5G New Radio to Support IoT, eMBB, and MBSFN,”.in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 78-83, JUNE 2018, doi: 10.1109/MCOMSTD.2018.1700021..
- [14] R. E. Rios, “5G Network Planning and Optimization Using Atoll,” Faculty of the Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona Universitat Politècnica de Catalunya, 2019.
- [15] 3GPP, “5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, (3GPP TR 38.901 version 14.0.0 Release 14),” Maio 2017.
- [16] P. Kyösti, J. Meinilä, L. Hentilä, X. Zhao, T. Jämsä, C. Schneider, M. Narandzić, M. Milojević, A. Hong, J. Ylitalo, V.-M. Holappa, M. Alatossava, R. Bultitude, Y. d. Jong e T. Rautiainen, “IST-4-027756 WINNER II D1.1.2 V1.2 WINNER II Channel Models Part I Channel Models,” 2008.
- [17] ITU-R, “Recommendation P.530-17, Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems,” 2017. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-17-201712-S!!PDF-E.pdf. [Acedido em 11 11 2023].
- [18] ITU-R, “Recommendation P.838-3, Specific attenuation model for rain for use in prediction methods,” 2005. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-E.pdf. [Acedido em 20 2 2024].
- [19] A. M. Q. Alves, “5G Coverage Optimization using Lower and Higher (mmWave) Frequency Bands,” Instituto Superior Técnico, Lisboa, Julho 2020.
- [20] ITU-R, “Attenuation by Atmospheric Gases,” 1997. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-3-199708-S!!PDF-E.pdf. [Acedido em 20 2 2024].
- [21] ITU-R, “The radio refractive index: its formula and refractivity data,” 1997. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.453-6-199705-S!!PDF-E.pdf. [Acedido em 20 2 2024].
- [22] iBwave, Disruptive Analysis, Top Trends for Private Networks in 2023, 2023.
- [23] A. Aijaz, “Private 5G The Future of Industrial Wireless”.in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 14, no. 4, pp. 136-145, Dec. 2020, doi: 10.1109/MIE.2020.3004975.

- [24] M. Wen, Q. Li, K. J. Kim, D. López-Pérez, O. A. Dobre, H. Poor, Vincent, P. Popovski e T. A. Tsiftsis, "Private 5G Networks: Concepts, Architectures, and Research Landscape".in *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 16, no. 1, pp. 7-25, Jan. 2022, doi: 10.1109/JSTSP.2021.3137669.
- [25] "3GPP TS 28.554 V17.8.0 (2022-09) 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects;Management and orchestration; 5G end to end Key Performance Indicators (KPI) (Release 17)".
- [26] ITU-T Telecommunication Standardization Sector of ITU, "Definitions of terms related to quality of service; Recommendation ITU-T E.800," 2008.
- [27] ETSI 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "ETSI TS 122 261 V16.14.0 (2021-04) 5G; Service requirements for the 5G system; (3GPP TS 22.261 version 16.14.0 Release 16)".
- [28] A. Gonzalez-Plaza, J. Moreno, I. Val, A. Arriola, P. Rodriguez, F. Jimenez e C. Briso, ""5G communications in high speed and metropolitan railways," 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Paris, France, 2017, pp. 658-660, doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928756".
- [29] E. -M. Oproiu, M. Iordache, C. Patachia, C. Costea e I. Marghescu, ""Development and implementation of a Smart City Use Case in a 5G mobile network's operator," 2017 25th Telecommunication Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/TELFOR.2017.8249292".
- [30] I. Markopoulos, L. Valcarenghi, I. Mesogiti, M. Taferner, P. Boleguin, F. Bouali, K. Tzanettis, I. Tzanettis, D. Hetzer, I. Känslä, O. Grøndalen, A. Gavras, A. Kaloxylou, K. Katsaros, P. Lundh, A. Cattoni e K. Trichias, "Service performance measurement methods over 5G experimental networks".*Zenodo*, Mai. 21, 2021. doi: 10.5281/zenodo.4748385.
- [31] 5G-SOLUTIONS, "5G-SOLUTIONSfor European Citizens - D1.1A - Definition and analysis of use cases/scenarios and corresponding KPIs based on LLs (v1.0)," 2019. [Online]. Available: https://www.5gsolutionsproject.eu/wp-content/uploads/2020/03/D1.1A-Definition-and-analysis-of-use-cases-scenarios-and-corresponding-KPIs-based-on-LLs_FNET_v1.4_29102019-final2.pdf. [Acedido em 21 1 2024].
- [32] S. M. A. Zaidi, M. Manalastas, H. Farooq e A. Imran, "SyntheticNET: A 3GPP Compliant Simulator for AI Enabled 5G and Beyond," *IEEE Access*. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2020.2991959. , 2020.

- [33] J. C. Ikuno, M. Wrulich e M. Rupp, "System level simulation of LTE networks".*2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference, Taipei, Taiwan, 2010, pp. 1-5, doi: 10.1109/VETECS.2010.5494007.*
- [34] S. Pratschner, M. K. Müller, F. Ademaj, A. Nabavi, B. Tahir, S. Schwarz e M. Rupp, "Verification of the Vienna 5G Link and System Level Simulators and Their Interaction".*2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, 2019, pp. 1-8, doi: 10.1109/CCNC.2019.8651694..*
- [35] M. K. Müller, . F. Ademaj, T. Dittrich, A. Fastenbauer, B. R. Elbal, A. Nabavi, L. Nagel, S. Schwarz e M. Rupp, "Flexible multi-node simulation of cellular mobile communications: the Vienna 5G System Level Simulator".*EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2018, 227 (2018). https://doi.org/10.1186/s13638-018-1238-7.*
- [36] Remko, PE1MEW, "Radio Mobile - RF propagation simulation software," [Online]. Available: <http://radiomobile.pe1mew.nl/>. [Acedido em 10 11 2023].
- [37] Remko, PE1MEW, "Radio Mobile - RF propagation simulation software," [Online]. Available: http://radiomobile.pe1mew.nl/?The_program___File_formats___Cartasian_raster_export_format. [Acedido em 10 11 2023].
- [38] A. Fastenbauer, A. Nabavi, A. Bokor, A. Shiyahin, T. Lipovec, J. Nausner, C. Buchner, B. R. Elbal, T. Dittrich, L. Nagel, M. Muller, . F. Ademaj, S. Schwarz e M. Rupp, User Manual - The Vienna 5G System Level Simulator, Institute of Telecommunications, TU Wien, Vienna, 2022.
- [39] "OpenStreetMap," [Online]. Available: <https://www.openstreetmap.org/>. [Acedido em 20 11 2023].
- [40] Y. Xie, S. Jin, J. Wang, Y. Zhu, X. Gao e Y. Huang, "A limited feedback scheme for 3D multiuser MIMO based on Kronecker product codebook,".*2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), London, UK, 2013, pp. 1130-1135, doi: 10.1109/PIMRC.2013.6666308.*
- [41] 3GPP, "TS 38.817-02 V15.8.0, General aspects for Base Station (BS) Radio Frequency (RF) for NR (Release 15)," Junho 2020.
- [42] C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication, Champaign, IL, USA: Univ. Illinois Press," 1949.

- [43] T. S. Rappaport, R. W. Heath, R. C. Daniels e J. N. Murdock, "Millimeter wave wireless communications," Upper Saddle River, NJ, USA; Prentice-Hall, 2015.
- [44] A. R. Mishra, "Fundamentals of Cellular Network Planning & Optimisation", John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 0-470-86267, 2004.
- [45] G. LLC, "Google Earth," [Online]. Available: <https://www.google.com/intl/pt-BR/earth/versions/#earth-pro>. [Acedido em 11 11 2023].
- [46] "QGIS Um Sistema de Informação Geográfica livre e aberto," [Online]. Available: https://qgis.org/pt_PT/site/index.html. [Acedido em 15 11 2023].
- [47] 3GPP, "5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone (3GPP TS 38.101-1 version 17.5.0 Release 17)," Maio 2022.
- [48] "5G Tools for RF Wireless - 5G NR Link budget calculator," [Online]. Available: <https://5g-tools.com/5g-nr-link-budget-calculator/>. [Acedido em 9 11 2023].
- [49] Z. Zhong, J. Zhao e C. Li, "Outdoor-to-Indoor Channel Measurement and Coverage Analysis for 5G Typical Spectrums". *International Journal of Antennas and Propagation*. 2019. 1-10. 10.1155/2019/3981678.
- [50] U. T. Virk, K. Haneda, V. -M. Kolmonen, P. Vainikainen e Y. Kaipainen, "Characterization of Vehicle Penetration Loss at wireless communication frequencies,". *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014), The Hague, Netherlands, 2014, pp. 234-238, doi: 10.1109/EuCAP.2014.6901733*.
- [51] Infraestruturas de Portugal, "Linha de Alta Velocidade Porto - Lisboa," [Online]. Available: <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/pt-pt/principais-investimentos/linha-de-alta-velocidade-porto-lisboa>. [Acedido em 20 01 2024].
- [52] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network, "3GPP TR 38.854 V18.0.0 (2023-09) NR support for high speed train scenario in frequency range 2 (FR2) (Release 18)".
- [53] P. Fan, J. Zhao e C.-L. I, "5G High Mobility Wireless Communications: Challenges and Solutions". *in China Communications, vol. 13, no. Supplement2, pp. 1-13, 2016, doi: 10.1109/CC.2016.7833456*.
- [54] Arup Alliance DfT Star Two TTWO 0036, "Mobile Connectivity in rolling stock – radio frequency attenuation characteristics," 2021.
- [55] "Train Logistic," [Online]. Available: https://www.trainlogistic.com/pt/Comboios/index_imag.htm. [Acedido em 10 1 2024].

- [56] A. Schumacher, R. Merz e A. Burg, “3.5 GHz Coverage Assessment with a 5G Testbed”.*2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/VTCSpring.2019.8746551.
- [57] “R. He et al., "A Standardized Path Loss Model for the GSM-Railway Based High-Speed Railway Communication Systems," 2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Seoul, Korea (South), 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTCSpring.2014.7022797.”.
- [58] Câmara Municipal Lisboa, “Candeeiros Gestor Geodados,” [Online]. Available: <https://geodados-cml.hub.arcgis.com/datasets/CML::candeeiros/about>. [Acedido em 27 1 2024].
- [59] Emerson, “Industrial IoT Devices: WirelessHART and 5G,” Maio 2020. [Online]. Available: <https://www.emerson.com/documents/automation/white-paper-industrial-iot-devices-wirelesshart-5g-en-6872874.pdf>. [Acedido em 26 1 2024].
- [60] lightenjin, “Iluminação Pública e Infraestruturas,” [Online]. Available: https://lightenjin.pt/pdfs/lightenjin_folh-publica_pt.pdf. [Acedido em 26 1 2024].
- [61] Aveiro Tech City Living Lab, “Estacionamento Inteligente no Parquet da Intermodalidade,” [Online]. Available: <https://www.aveirotechcity.pt/pt/atividades/aveiro-tech-city-living-lab/projetos/estacionamento-inteligente-no-parquet-da-intermodalidade>. [Acedido em 25 2 2024].
- [62] 5G Americas, “A 5G Americas White Paper, Understanding mmWave for 5G Networks (2020)”.
- [63] Z. Feng, J. Rui, S. Jinglu, C. Kai, . X. Wei e Z. Xiangyang, “Analysis on the vehicle-induced path loss for millimetre-wave V2V communication”.*IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2021, 15, pp. 495–502 , doi: <https://doi.org/10.1049/mia2.12061>.
- [64] “Gillies, S., van der Wel, C., Van den Bossche, J., Taves, M. W., Arnott, J., Ward, B. C., & others. (2023). Shapely (Version 2.0.2) [Computer software].,” [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5597138>. [Acedido em 16 11 2023].
- [65] “ETSI TS 136 213 V15.8.0 (2020-02) LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (3GPP TS 36.213 version 15.8.0 Release 15)”.