



Melhoria da Cobertura da Rede Móvel na Ilha da Madeira

Alexandre Miguel Pita Gaspar

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. António Luís Campos da Silva Topa

Júri:

Presidente: Prof. José Eduardo Charters Ribeiro da Cunha Sanguino

Orientador: Prof. António Luís Campos da Silva Topa

Vogal: Prof. António José Castelo Branco Rodrigues

Junho 2020

Alexandre Gaspar, 2020

Declaração

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

Agradecimentos

A realização desta dissertação representa um grande marco na minha vida, a concretização de um objetivo pessoal sustentado pelo apoio de todos os que direta ou indiretamente participaram neste meu percurso académico, sujeitando-me ao risco de perpetrar alguma omissão despropositada não poderia deixar de agradecer aos seguintes intervenientes.

Em primeiro lugar ao meu orientador Professor/Doutor António Topa pela disponibilidade em orientar este projeto bem como pelo apoio e motivação concedidos.

Aos meus pais, por possibilitarem, por estarem constantemente presentes, por todo o seu apoio e motivação ao longo de todo este percurso. A estes devo tudo.

Aos meus irmãos Dinarte, Rubina e André por serem quem são e por nunca me deixarem desistir de concretizar os meus sonhos, apoiando cada uma das minhas decisões ao longo do curso.

Ao meu padrinho Nélio, por toda a preocupação por me acompanhar de perto nos altos e baixos momentos do meu percurso e por ser sempre um verdadeiro ombro amigo.

Ao meu primo Bruno, único familiar residente em Lisboa, por ter sido um verdadeiro irmão, pela sua incrível disponibilidade e presença, e por ser um forte pilar na minha motivação para a realização do mestrado.

Aos amigos e colegas de curso Martin, Ricardo, Gonçalo e todos os não mencionados, mas não menos importantes, o companheirismo demonstrado, a partilha de ideias e a união nesta caminhada.

À minha avó, presente fisicamente até metade do meu percurso, mas que, na verdade nunca deixou de estar presente. Obrigado por toda a preocupação, por toda a motivação e por todo o apoio prestado.

Esta Dissertação teve como instituição de acolhimento o Instituto de Telecomunicações, (IT), Pólo de Lisboa

Resumo

As comunicações sem fios e em especial as móveis, são neste momento indispensáveis, não só pelo facto de melhorar o dia a dia dos utilizadores que não estão “presos” ao serviços de cabo, como pela redução de custos de implementação de redes fixas por parte das operadoras de comunicações, especialmente em zonas de difícil acesso.

O número de utilizadores continua a aumentar, pelo que durante algum tempo alguns dos desafios eram a redução de interferência e aumento da percentagem de território coberto. Neste momento, o grande objetivo das operadoras é, conseguir fornecer maiores ritmos de transmissão e menor latência aos utilizadores, cada vez mais exigentes no que toca a transferência de dados bidirecional.

Este trabalho teve como principal objetivo o estudo da cobertura e propagação da rede 4G no território da ilha da Madeira, especificamente, a identificação de locais problemáticos e a apresentação de possíveis soluções de resolução do problema. Este tipo de estudo é fundamental devendo ser efetuado por todas as operadoras, de forma a adquirir clientes, bem como mantê-los satisfeitos.

Inicialmente identificou-se cada local problemático, realizaram-se as medições e posterior análise à orografia do terreno e ambiente no qual os terminais móveis dos utilizadores se inserem. De seguida verificou-se, através de uma aplicação, a que estação base os utilizadores se conectavam, bem como as estações mais próximas.

Realizou-se para cada caso de estudo, simulações através dos modelos de propagação para comunicações móveis e pelo modelo de *Longley-Rice*, através do *software Matlab*. O objetivo destas era verificar a concordância com o valor medido e posterior comparação com o valor obtido após escolha de uma solução, de forma a confirmar a viabilidade da solução a nível de engenharia.

As análises realizadas foram essencialmente sobre a rede 4G da MEO, no entanto, utilizou-se um cartão de outra operadora, nomeadamente da Vodafone, complementando o trabalho com a comparação dos sinais medidos entre as duas operadoras, numa das zonas de teste.

Por fim, realizou-se o planeamento de uma célula num local sem qualquer tipo de cobertura, testando dois dos vários cenários possíveis, através de simulações.

Palavras-chave: Comunicações Móveis, Interferência, Estação Base, *Longley-Rice*, Cobertura.

Abstract

Wireless communications, especially mobile ones are now indispensable, not only because they improve the daily lives of users who are not “stuck” to cabling service, but also because of the reduction in costs for the implementation of fixed networks by communications operators, especially in areas with difficult access.

The number of users has been increasing, so for some time one of the challenges was reducing interference and increasing the percentage of covered territory. Currently, the major objective of the operators is to be able to provide higher transmission rates and lower latency to users, who are more and more rigorous when it comes to bidirectional data transfer.

This work had as main objective the study of the coverage and propagation of the 4G network in the territory of the Madeira island, specifically, the identification of problematic places and the presentation of possible solutions to solve the problem. This type of study is essential and must be carried out by all operators, to acquire customers, as well as keep them satisfied.

Initially, each problematic location was identified, measurements were taken, and the terrain and environment were analyzed in which the mobile terminals are inserted. Then, it was verified, through an application, which base station the users connected to, as well as the nearest stations.

For each case study, simulations were carried out using the propagation models for mobile communications and the Longley-Rice model, using the Matlab software. The objective of these was to verify the agreement with the measured value and later comparison with the value obtained after choosing a solution, to confirm the viability of the solution at the engineering level.

The analyzes carried out were essentially on MEO's 4G network, however, a card from another operator, namely Vodafone, was used, complementing the work with the comparison of the signals measured between the two operators, in one of the test zones.

Finally, a cell was planned in a location without any type of coverage, testing two of the various possible scenarios, through simulations.

Keywords: Mobile Communications, Interference, Base Station, Longley-Rice, Coverage.

Lista de Acrónimos

AMPS - *Advance Mobile Phone Systems*
AP - *Acess Point*
BF – *Beamforming*
BPSK – *Binary Phase Shift Keying*
BS – *Base Station*
CDMA – *Code Division Multiple Acess*
CEPT – *Conferência Europeia das Administrações de Correios e Telecomunicações*
CF – *Corretion Fators*
CID – *Cell Identification*
DAA – *Distributed Architecture Acess*
DCS – *Digital Cellular System*
DNS – *Domain Name Service*
DPA-MIMO – *Distributed Phased Array MIMO*
D2D – *Device to Device*
EARFCN – *Absolute Radio Frequency Number*
EDGE - *Enhanced Data for GSM Evolution*
eNB – *Evolved Node B*
E-UTRA – *Evolved Universal Terrestrial Radio Acess*
FDMA – *Frequency Division Multiple Acess*
FQDN – *Fully Qualified Domain Names*
GMSK – *Gaussian MSK*
GPRS – *General Packet Radio Service*
GPS – *Global Positioning System*
GSM – *Global System for Mobile Communications*
HNI – *Home Network Identity*
HSPA – *High Speed Packet Acess*
IMSI – *Integrated Mobile Subscriber Identity*
IP – *Internet Protocol Address*
LTE – *Long Term Evolution*
MAC – *Media Acess Control*
MCC – *Mobile Country Code*
MIMO – *Multiple Input Multiple Output*
MMS – *Multimedia Message Service*
MNC – *Mobile Network Code*
MSIN – *Mobile Subscriber Identification Number*
MSK – *Minimum Shift Keying*
NID – *Network Interface Devices*
NPP - *Nippon Telegraph and Telephone*
OFDMA – *Orthogonal Frequency Division Multiple Acess*
PAPR – *Peak-to-Average Power Ratio*
PID – *Physical Cell Identification*
PUCCH – *Physical Uplink Control Channel*
PUSCH – *Physical Uplink Shared Channel*
QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*
QoS – *Quality of Service*
QPSK – *Quadrature Phase Shift Keying*

RSRP – *Reference Signal Received Power*
RSRQ – *Reference Signal Received Quality*
RSSNR – *Reference Signal Signal to Noise Ratio*
SC-FDMA – *Single Carrier Frequency Multiple Access*
SIM – *Subscriber Identity Module*
SMS – *Short Message Service*
SNR – *Signal to Noise Ratio*
SRS – *Sounding Reference Signals*
SRV – *Service Record*
TA – *Timing Advance*
TA – *Tracking Area*
TAC – *Tracking Area Code*
TDMA – *Time Division Multiple Access*
UMTS – *Universal Mobile Telecommunication System*
VoLTE – *Voice over LTE*
WCDMA – *Wide Band Code Division Multiple Access*

Índice

Agradecimentos	IV
Resumo.....	VI
Abstract.....	VIII
Lista de Acrónimos.....	X
Índice de figuras.....	XIV
Índice de tabelas	XVI
1 Introdução.....	2
1.1. Motivação.....	3
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Organização do documento.....	4
2 Estado de Arte	6
2.1 Redes Celulares.....	6
2.2 GSM – Global System for Mobile Communications.....	8
2.2.1 TDMA – Time Division Multiple Access.....	9
2.2.2 FDMA – Frequency Division Multiple Access.....	9
2.3 UMTS – Universal Mobile Telecommunications Systems	10
2.4 LTE – Long Term Evolution.....	11
2.4.1 OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access.....	12
2.4.2 SC-FDMA – Single Carrier Frequency Division Multiple Access	12
2.5 Estimativa de Cobertura.....	13
2.6 Fading	13
2.7 Diversidade	14
2.7.1 Diversidade de Tempo, Diversidade de Frequência e diversidade de polarização	14
2.7.2 Diversidade Espacial	16
2.8 Equalizadores.....	17
2.9 Efeito Doppler.....	17
2.10 Handover	18
2.11 Modulações de Transmissão	18
2.12 Sensibilidade do Recetor	21
3 Modelos de Propagação.....	22
3.1 Modelo de Longley-Rice.....	22
3.2 Propagação em Espaço Livre	23
3.3 Propagação em Terra Plana	23

3.4	COST 231 – Modelo de <i>Okumura-Hata</i>	24
3.5	Modelo de <i>Ikegami</i>	26
3.6	Modelo Walfisch-Bertoni	27
3.7	COST 231 – Walfisch-Ikegami	28
3.8	Fatores de Atenuação Complementar.....	29
3.8.1	Modelo do Knife-Edge	29
3.8.2	Influência da Vegetação	30
3.9	Cobertura em Interiores	30
4	Projeção Para o Futuro.....	32
5	Melhoria dos Parâmetros de Cobertura.....	38
5.1	Ferramentas de Medição e Simulação.....	39
5.2	Estudo de Caso – Troço da Estrada dos Esmeraldos.....	42
5.2.1	<i>Outdoor</i>	44
5.2.2	<i>Indoor</i>	47
5.2.3	Análise de Soluções	48
5.2.4	Comparação Com Outra Operadora	52
5.3	Estudo de Caso – Centro de Saúde da Ponta do Sol	54
5.3.1	<i>Outdoor</i>	56
5.3.2	<i>Indoor</i>	58
5.3.3	Análise de Soluções	59
5.4	Estudo de Caso – AVASAD Funchal.....	60
5.4.1	<i>Outdoor</i>	62
5.4.2	<i>Indoor</i>	65
5.4.3	Análise de Soluções	67
5.5	Estudo de Caso – Fonte do Bispo.....	69
5.5.1	Projeto e Simulação.....	71
6	Conclusão.....	76
6.1	Trabalhos Futuros	77
7	Bibliografia.....	78

Índice de figuras

Figura 2.1 - Representação de um sistema celular de comunicações móveis [11].	6
Figura 2.2 - Representação de três sectores numa rede celular.	7
Figura 2.3 - Representação de interferência resultante de um mau planeamento de frequências.	8
Figura 2.4 - Planeamento de frequências para uma rede de comunicações móveis.	8
Figura 2.5 – Representação esquemática do funcionamento do TDMA [16].	9
Figura 2.6 – Representação do sistema de funcionamento do FDMA [16].	10
Figura 2.7 – Representação do sistema de funcionamento do CDMA [16].	10
Figura 2.8 – Representação do esquemático e funcionamento do CDMA no emissor [16].	11
Figura 2.9 - Representação do esquemático e funcionamento do CDMA no recetor [16].	11
Figura 2.10 – Representação do sistema de funcionamento do OFDMA [16].	12
Figura 2.11 – Representação do sistema de funcionamento do SC-FDMA [16].	12
Figura 2.12 - Influência dos dois tipos de fading na potência recebida em função da distância [15].	14
Figura 2.13 – Funcionamento dos sistemas de diversidade de tempo e diversidade de frequência [23].	15
Figura 2.14 – Representação esquemática das antenas de Comunicações Móveis.	15
Figura 2.15 - Representação da transmissão com diversidade espacial.	16
Figura 2.16 - Representação do sistema de multiplexagem espacial.	16
Figura 2.17 - Sistema de Comunicações com equalizador.	17
Figura 2.18 - Representação da ocorrência de handover entre duas células.	18
Figura 2.19 - Relação de taxa de erro por símbolo com SNR por símbolo tendo em conta o índice de modulação [15].	19
Figura 3.1 - Dependência da frequência e distância no modelo de propagação em espaço livre. [1].	23
Figura 3.2 - Função do campo elétrico relativo à propagação em espaço livre em função da distância [22].	24
Figura 3.3 - Representação do ambiente de propagação correspondente ao modelo de Ikegami [22].	26
Figura 3.4 - Representação do ambiente para utilização do modelo de Walfisch-Bertoni [22].	27
Figura 3.5 – Representação do ambiente de propagação para utilização do modelo de Walfisch-Ikegami [22].	28
Figura 3.6 - Representação da propagação com existência de vegetação.	30
Figura 3.7 - Representação da propagação desde a BS até ao interior do edifício [22].	31
Figura 4.1 - Representação de algumas capacidades do 5G IoT [34].	32
Figura 4.2 - Representação da tecnologia <i>beamforming</i> [41].	34
Figura 4.3 - Smartphone 5G com <i>beamforming</i> convencional, módulos BF na zona superior e inferior e arquitetura DPA-MIMO [42].	35
Figura 4.4 - Crescimento do tráfego de dados móveis à escala global [40].	36
Figura 5.1 - Exemplo de utilização da função <i>coverage</i> .	40
Figura 5.2 - Funcionalidades da aplicação de medida <i>Network Cell Info</i> .	41
Figura 5.3 - Relação dos parâmetros MCC MNC MSIN e IMSI	42
Figura 5.4 - Identificação da área de estudo e condições topográficas.	43
Figura 5.5 - Ilustração da ligação do terminal móvel à tecnologia 4G e 2G.	43
Figura 5.6 - Representação do perfil do terreno com cotas.	44
Figura 5.7 - Medição em ambiente exterior na Estrada dos Esmeraldos.	44
Figura 5.8 - Simulação do mapa de cobertura de potência.	46
Figura 5.9 - Medição no interior de uma habitação na Estrada dos Esmeraldos.	47

Figura 5.10 - Solução da criação de uma estação base.	48
Figura 5.11 - Simulação da modificação da BS da Tabúa.	49
Figura 5.12 - Demonstração de uma pico ou femto célula [47].	50
Figura 5.13 - Representação do caso real da padaria “Delícia Caseira”.....	51
Figura 5.14 - Apresentação dos dados de funcionamento do aparelho.	51
Figura 5.15 - Identificação da localização da base station da Vodafone ao qual o terminal móvel está conectado.....	52
Figura 5.16 - Medição na Estrada dos Esmeraldos e representação do perfil do terreno na área de propagação.....	53
Figura 5.17 - Identificação da localização da BS conectada em ambiente interior.	53
Figura 5.18 - Medição em ambiente interior e representação do perfil do terreno na área de propagação.	54
Figura 5.19 - Identificação da BS, zona de estudo e tipo de terreno circundante.	55
Figura 5.20 - Representação da BS da antiga esquadra PSP da Ponta do Sol.....	55
Figura 5.21 - Medição realizada junto ao centro de saúde da Ponta do Sol em ambiente outdoor.	56
Figura 5.22 - Representação da distribuição da potência radiada no terreno.	57
Figura 5.23 - Medição realizada no interior do centro de saúde da Ponta do Sol.	58
Figura 5.24 - Representação da potência radiada no mapa com a BS no edifício da câmara municipal...	59
Figura 5.25 - Identificação da localização da BS e caraterísticas da zona de estudo.	61
Figura 5.26 - Identificação da localização da BS conectada.	61
Figura 5.27 - Medição realizada junto à AVASAD em ambiente outdoor.	62
Figura 5.28 - Representação da potência radiada no mapa.	63
Figura 5.29 - Medições realizadas em ambiente indoor com o terminal móvel conectado ao eNB 6409...	66
Figura 5.30 - Medições realizadas em ambiente indoor com o terminal móvel conectado ao eNB 1822...	66
Figura 5.31 - Mapa de cobertura com a adição do setor direcionado para a zona problemática.	68
Figura 5.32 - Fonte do Bispo.....	70
Figura 5.33 - Localização da zona de estudo e das <i>base stations</i> adjacentes na rede MEO.	70
Figura 5.34 - Identificação da zona problemática.....	71
Figura 5.35 - Simulação do mapa de cobertura de potência.....	72
Figura 5.36 - Mapa de cobertura com antena omnidirecional.	73

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Modulações utilizadas na tecnologia GSM [15].....	19
Tabela 2.2 - Modulações utilizadas na tecnologia UMTS [15].....	20
Tabela 2.3 - Modulações utilizadas na tecnologia LTE [15].	20
Tabela 2.5 - SNR mínimo para funcionamento dependo da modulação e do <i>code rate</i> [28].	21
Tabela 3.1 - Atenuação introduzida pelos edifícios por banda segundo o modelo de Lisboa [22].	31
Tabela 5.1 - Níveis de cobertura radioelétrica em GSM, UMTS e LTE [44].	38
Tabela 5.2 - Distribuição das várias faixas de frequências [19].	38
Tabela 5.3 - Parâmetros técnicos considerados nas simulações para transmissão na banda dos 800 MHz.	45
Tabela 5.4 - Apresentação dos valores de potência recebida medida e nas simulações.	47
Tabela 5.5 - Apresentação do valor medido e simulado para ambiente interior.....	48
Tabela 5.6 - Parâmetros técnicos considerados nas simulações para transmissão na banda dos 800 MHz.	57
Tabela 5.7 - Apresentação dos valores de potência recebida medida e nas simulações.	58
Tabela 5.8 - Apresentação do valor medido e simulado para ambiente interior.....	59
Tabela 5.9 - Parâmetros técnicos estimados na célula 6409 e 1822.	62
Tabela 5.10 - Apresentação dos valores de potência recebida medida e nas simulações.	65
Tabela 5.11 - Apresentação do valor medido e simulado para ambiente interior.....	67
Tabela 5.12 - Parâmetros técnicos para a simulação nos 800 MHz	72
Tabela 5.13 - Apresentação dos valores de potência recebida em todas as simulações.	74

1 Introdução

A história das comunicações via rádio começou com *James Clerk Maxwell*, tendo como base de partida e fundamento as suas descobertas na área do eletromagnetismo, bem como outras descobertas de extrema importância, entre as quais se podem destacar as de *Michael Faraday*, *Alexander Graham Bell*, entre outros [1].

Este tipo de comunicação tem como grande vantagem a mobilidade. Este aspeto assume claramente destaque no que concerne à usabilidade das comunicações. Visto que as comunicações móveis garantem uma área de cobertura, garantindo um serviço de disponibilidade mínimo, é possível aos seus utilizadores comunicarem entre pontos remotos do planeta. Esta circunstância tem como principal destaque o facto de permitir que a comunicação entre dois pontos possa ser estabelecida num tempo imperceptível para os utilizadores, sem que este se tenha de preocupar com a sua localização [1].

Foi nos laboratórios *Bell*, da *AT&T* que nasceram as comunicações móveis, nos anos 70, sendo considerado na altura o primeiro sistema de comunicação móvel de “alta capacidade” (*AMPS*). Apesar de o sistema *NTT* do Japão ter sido lançado pouco antes, foi em 1983 que surgiu o sistema celular nos mercados dos Estados Unidos da América, sendo estes sistemas implementados com recurso a tecnologia analógica. Ao início, como o número de utilizadores era bastante reduzido, conseguia-se garantir o mínimo de qualidade de serviço, no entanto, devido ao aumento de utilizadores, surgiu a necessidade de evoluir os sistemas de tecnologia analógica para digital [2] [3].

A primeira geração de sistemas móveis (1G) surge então em 1980, possibilitando apenas a comunicação por voz, através de um sistema analógico. Nesta altura, por serem transmissões analógicas, os sistemas eram bastante limitados em qualidade, ocorriam muitas interferências e a segurança muito reduzida, sendo as escutas telefónicas tarefas relativamente simples [4] [5].

Na segunda geração, o grande objetivo era a evolução dos sistemas, sendo esta caracterizada pela transmissão de sinais digitais, ao contrário da primeira geração. O 2G surgiu no início dos anos 90 e para além das transmissões digitais, trouxe consigo a possibilidade de envio de SMS (*Short Message Service*) e MMS (*Multimedia Message Service*). A tecnologia utilizada é o GSM (*Global System for Mobile Communications*) sendo este ainda utilizado nos dias de hoje. O acesso múltiplo é garantido através da combinação do FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) e TDMA (*Time Division Multiple Access*). Nesta altura os telemóveis já apresentavam dimensões bem menores e utilizavam um cartão de identificação (*Subscriber Identity Module*), que ainda hoje é utilizado de forma a identificar o utilizador e as suas características de tarifário [4] [5].

Entre a segunda e a terceira geração é de importância frisar a passagem para utilização de tecnologia de pacotes como o GPRS (*General Packet Radio Service*), tornando assim o acesso à internet bem mais rápido e eficiente [4] [5].

A terceira geração surge no início nos anos 2000 como solução para as limitações das redes de segunda geração da altura. Com o aumento de utilizadores surge a necessidade de aumentar a sua capacidade, melhoria na qualidade de serviços, como a transmissão de voz e rapidez de acesso à

internet. O 3G trouxe, para além das características acima referidas, a navegação por *Assisted GPS*, serviços multimédia, entre outros [5].

Com a evolução do GSM surge o UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), tendo como principal objetivo a definição de um padrão universal que garanta a qualidade do serviço com uma grande quantidade, face a um número avultado de utilizadores através de elevadas taxas de transmissão, sendo estas simétricas e assimétricas, permitem uma maior eficiência espectral através do uso de CDMA (*Code Division Multiple Access*) como sistema de acesso múltiplo, transmissão em modo circuito e em modo pacote e multimédia [6].

Nesta altura um grande desafio foi a compatibilidade com a rede da geração anterior, visto que a mudança de uma tecnologia para outra é um processo relativamente demorado, levando anos a ser realizado, e por isso, optou-se pela reutilização de várias características do 2G, especificamente a mesma rede de suporte dos sistemas GPRS e EDGE [7].

A quarta geração surgiu em 2011 com praticamente os mesmos objetivos das evoluções anteriores, acrescentando ainda a novidade da utilização pura de sistemas IP. Também chamada de LTE (*Long Term Evolution*), é a tecnologia utilizada atualmente [8].

Nesta geração, as limitações são relativamente diminutas visto que as comunicações possuem débitos de transmissão elevados, sistemas de segurança de alta performance que garantem a integridade e privacidade das comunicações, e uma qualidade de serviço correspondida na maior parte do tempo de serviço [9].

A grande limitação da quarta geração e dos dias de hoje é a autonomia, visto que para todas estas características evoluídas e de grande potencial funcionarem requerem energia, e com a evolução dos sistemas de comunicações móveis, os utilizadores pretendem ter um dispositivo cada vez mais móvel, isto é, relativamente pequeno, leve e fino, o que ainda complica mais a questão da energia visto que o espaço para a bateria fica limitado, o que resulta numa capacidade de autonomia limitada também [9].

1.1. Motivação

A rede de comunicações móveis da ilha da Madeira, tal como qualquer outra apresenta algumas fragilidades, estando por isso as operadoras constantemente a tentar melhorar a qualidade da sua rede, no entanto, as decisões tomadas pelas operadoras visam sempre a maximização de lucro, o que é normal e compreensível.

Do ponto de vista da radiopropagação, há vários aspetos a melhorar na rede de comunicações móveis da ilha da Madeira. Os aspetos topográficos desta região dificultam o processo de planeamento da rede, até porque a indiscutível presença de montanhas cria várias zonas de sombra que obviamente manifestam-se como um problema difícil de contornar.

O processo de melhoria de cobertura da rede é extremamente complexo e difícil porque o grande desafio é a minimização de custos, no entanto, uma simples alteração do ângulo de uma antena pode de facto melhorar a cobertura numa determinada zona e não apresentar praticamente nenhuma despesa. No entanto esta alteração pode pôr em risco a cobertura noutra zona anteriormente com

cobertura, acabando por surgir novas reclamações, o que com certeza não vai de encontro às aspirações de nenhuma operadora.

1.2. Objetivos

Estudo e compreensão da(s) rede(s) presente(s) na ilha da Madeira, interpretar e questionar o dimensionamento dos parâmetros técnicos das estações base, nomeadamente a escolha da sua localização, a altura da torre, ângulos das antenas e frequência de transmissão, e com estes parâmetros a capacidade de cobertura.

Identificação de falhas na cobertura da rede, perceber o motivo, estudar as soluções possíveis e justificar a solução apresentada com a melhoria, tendo sempre em conta a minimização de custos o quanto possível.

Análise crítica com base nas medições realizadas e com os resultados obtidos nas simulações realizar comparações, tendo sempre presente que nenhum modelo é perfeitamente correto para qualquer ambiente de propagação, apesar dos fatores de correção.

Por fim, retirar as devidas conclusões do estudo realizado ao longo da dissertação e apresentar eventuais trabalhos futuros.

1.3. Organização do documento

Esta dissertação divide-se em 7 capítulos, em primeiro lugar o capítulo introdutório em que se introduz o tema, a motivação, os objetivos e a organização da dissertação.

De seguida, como 2º capítulo tem-se o estado de arte em que se apresenta toda a base teórica por detrás do estudo realizado.

No terceiro capítulo são descritos os modelos de propagação e a forma como cada um deve ser escolhido com base nos requisitos de utilização e das características do ambiente.

No quarto capítulo apresenta-se aquele que será o futuro mais provável das comunicações móveis, nomeadamente alguns aspetos tecnológicos e estatísticos da nova tecnologia, o 5G.

No quinto capítulo tem-se as ferramentas utilizadas nas simulações, bem como as simulações e medições propriamente ditas, realizadas em cada caso de estudo. Este capítulo inclui ainda as possíveis soluções de melhoria de forma a garantir cobertura radioelétrica.

No sexto capítulo apresentam-se as conclusões bem como as sugestões para os trabalhos futuros.

Por fim, o sétimo capítulo contém as referências bibliográficas utilizadas na escrita da dissertação.

2 Estado de Arte

Neste capítulo apresenta-se o conteúdo teórico do tema da dissertação, sendo este o estudo e compreensão da cobertura numa rede de comunicações móveis. Neste capítulo apresentam-se as redes celulares e segue-se para a explicação e compreensão das suas características tais como os métodos de acesso de cada tecnologia e os fenómenos físicos associados à transmissão via rádio.

2.1 Redes Celulares

Os serviços de cobertura por estações terrestres são garantidos através de um sistema de células, sendo que este tipo de serviço é mais indicado para servir áreas pequenas comparativamente aos sistemas de cobertura por satélite por exemplo. Normalmente as células variam de tamanho entre vários quilómetros e alguns metros em função da quantidade de tráfego numa determinada zona. O que motiva a utilização do sistema células é a reutilização de frequências [10].

Na Figura 2.1 verifica-se ilustrado um sistema de rede celular para a tecnologia GSM.

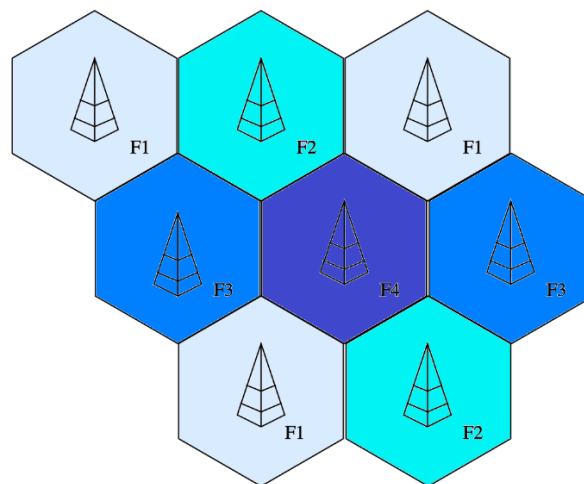


Figura 2.1 - Representação de um sistema celular de comunicações móveis [11].

Observando atentamente a figura anterior, verifica-se que as frequências iguais encontram-se sempre distanciadas de forma a reduzir ao mínimo possível a interferência co-canal. Quanto ao número de frequências por célula depende do cluster, sendo que o projeto do sistema deve ser feita tendo em conta a interferência, o número de células no cluster e ainda a capacidade [12].

Os cenários de propagação são caracterizados e distinguidos numa primeira fase por interiores ou exteriores, no entanto, a classificação é mais complexa do que isto visto que, os ambientes são todos diferentes, não só pela posição dos seus constituintes, mas também pelo grau de urbanização, tipo de terreno, florestação, altura dos prédios e até pela própria cultura do povo no que toca a padrões de construção relacionadas com a disposição dos prédios e escolha de material de construção destes. É devido a todas estas variáveis que é impossível e irrealista tentar encontrar modelos matemáticos que permitam caracterizar a propagação em qualquer ambiente [13].

Um bom planeamento da rede celular é crucial para o bom funcionamento do sistema de comunicações e para atingir níveis de QoS minimamente satisfatórios. A escolha do local para a instalação da *base station* é feita com base na área de cobertura desejada, sabendo que a interferência

com células vizinhas tem de ser sempre reduzida ao mínimo e que os recursos radio devem ter uma gestão otimizada. Para além destes fatores, é de extrema relevância a correta escolha no modelo de propagação, para que os valores simulados façam algum sentido no projeto do sistema [9].

A divisão do terreno em células diferentes possibilita a conexão de vários utilizadores e por isso nos ambientes urbanos, onde o número de utilizadores é característico ter um maior número de células, visto que o aumento de utilizadores diminui a capacidade da célula, devido à divisão da largura de banda por todos os utilizadores [10].

Para os ambientes urbanos, extremamente condicionados pelo número de utilizadores a solução passa pela utilização de setorização [10].

A sectorização corresponde à divisão das células em partes tal como representado na Figura 2.2.

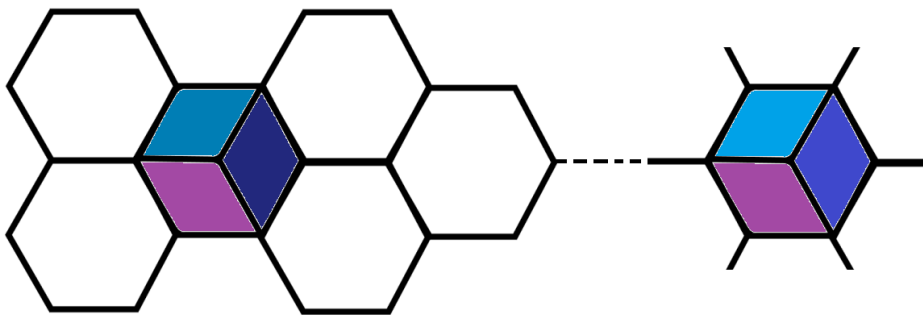


Figura 2.2 - Representação de três sectores numa rede celular.

Da sectorização nascem novas células através da utilização de antenas diretivas, isto é, cada sector passa a comportar-se como uma célula distinta, o que se torna ideal para grandes centros urbanos.

O grande objetivo desta divisão é a diminuição da interferência co-canal, apresentando ainda a vantagem da redução da distância de reutilização, resultando no aumento da capacidade [1].

A sectorização aumenta a relação sinal-interferente, sendo então este fator calculado pela equação seguinte:

$$\frac{C}{I_{cc}} = \frac{1}{r_{cc}^{-a_{pd}} + (r_{cc} + 1/\sqrt{2})^{-a_{pd}}} \quad (2.1)$$

O termo r_{cc} correspondente à *co-channel reuse ratio* e a_{pd} *average power decay*. O r_{cc} depende essencialmente do número de células num cluster, sendo 4, 1 e 3 para GSM, UMTS e LTE respetivamente. O a_{pd} depende do modelo de propagação utilizado sendo que normalmente este fator toma valores entre 2 e 4 [12].

Verifica-se que a sectorização faz com que se aumente a relação sinal-interferente comparativamente a uma célula normal, o que é bastante benéfico do ponto de vista de minimização de ocorrência de erros e de aumento da probabilidade de tempo de cobertura [12].

O planeamento de frequências é um fator decisivo no planeamento de uma rede de comunicações móveis. Na Figura 2.3 tem-se representado um exemplo de mau planeamento de frequências numa rede celular [9].

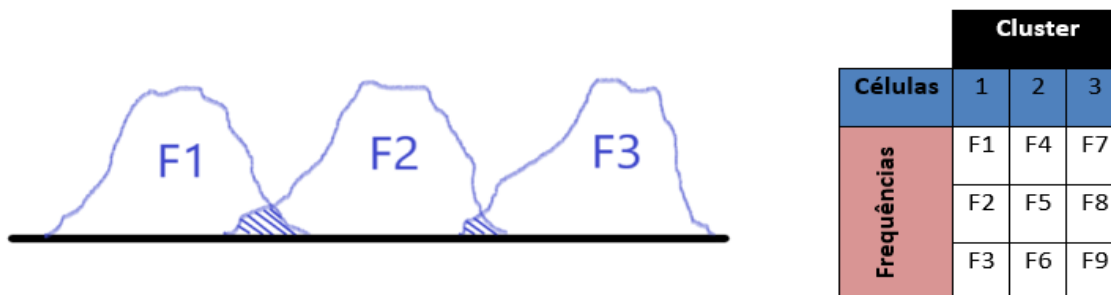


Figura 2.3 - Representação de interferência resultante de um mau planeamento de frequências.

Constata-se que ao utilizar frequências próximas (vizinhas) dentro da mesma célula a probabilidade de ocorrer interferência é elevada, sendo que a solução passa por usar as mesmas frequências mas com uma disposição diferente, especificamente o mais distante possível tal como representado na Figura 2.4 [9].

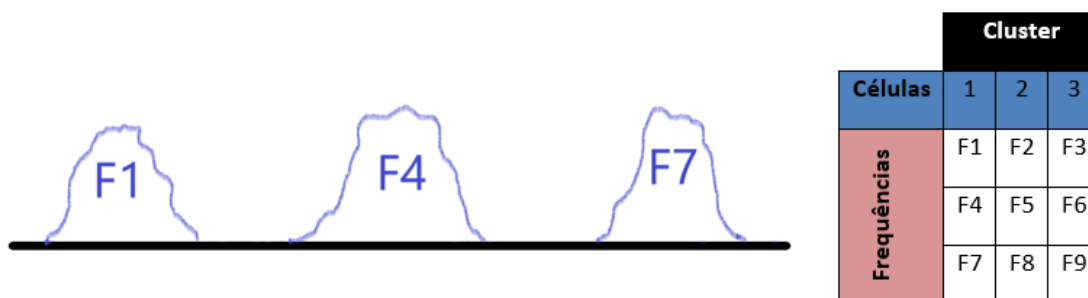


Figura 2.4 - Planeamento de frequências para uma rede de comunicações móveis.

Verifica-se que no caso desta célula, não há ocorrência de interferência visto que as frequências estão suficientemente espaçadas sendo, portanto, esta técnica muito superior à anteriormente apresentada [9].

A sectorização tem como desvantagens o aumento do número de antenas na BS, e o aumento do número de *handoffs*, no entanto, estas circunstâncias dificilmente são perceptíveis pelos utilizadores [9].

2.2 GSM – Global System for Mobile Communications

O GSM, também conhecido por 2G, surgiu comercialmente nos anos 90 e representou um grande progresso nos sistemas de comunicações móveis devido à tecnologia envolvida. Até então as comunicações móveis eram analógicas, a largura de banda era muito inferior, sendo impossível a transmissão de dados. Comparativamente aos sistemas analógicos, o GSM apresenta uma maior resistência ao ruído e interferência [14].

Opera nas frequências de 900 MHz e 1800 MHz (DCS) e o acesso de utilizadores é feito através de *time division multiple access* (TDMA) e *frequency division multiple access* (FDMA). No que toca ao tipo de comutação, esta é praticamente toda de circuitos, à exceção do GPRS. A comutação por circuitos é essencialmente utilizada na transmissão de voz, em que cada chamada utiliza

constantemente um circuito completo, até mesmo nos instantes em que não está a ser transmitida informação. Neste tipo de comutação, quando não há canal disponível não se pode fazer uma ligação até haver canal disponível, fazendo, portanto, todo o sentido a análise de probabilidade de bloqueio [14].

A transmissão de informação bidirecional em sistemas *duplex* é feita por divisão no tempo ou na frequência. No tempo os canais descendentes e ascendentes utilizam janelas de tempo diferentes, enquanto que no caso da divisão na frequência, os canais descendentes e ascendentes ocupam bandas de frequências distintas [15].

O número de canais de tráfego é 8 vezes o número de canais rádio sendo que a este valor ainda tem de ser subtraído os canais de controlo. O número de canais é fixo para cada *base station* [15].

2.2.1 TDMA – Time Division Multiple Access

No TDMA cada utilizador tem acesso a toda a banda e é-lhe atribuído um *time-slot* periodicamente. Este tipo de acesso requer a utilização da hierarquia de *frames* e *time-slots* tal como representado na Figura 2.5.

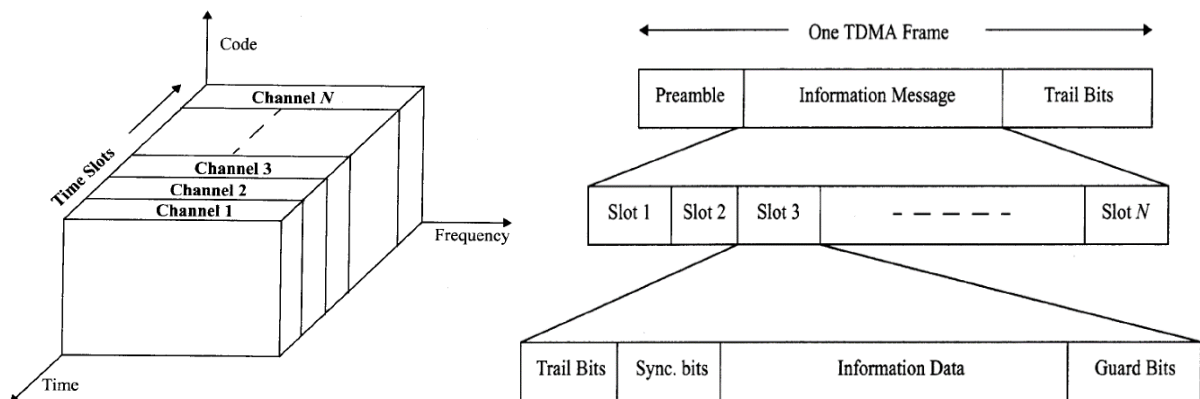


Figura 2.5 – Representação esquemática do funcionamento do TDMA [16].

Este tipo de acesso tem como vantagens a capacidade de ter vários canais numa única portadora, *burst transmission*, não necessita de filtros *duplex*, tem um *handover* eficiente e funciona em sistemas de banda estreita e banda larga. Por outro lado, exige bastante sincronismo, apresenta uma elevada suscetibilidade à interferência intersimbólica e costuma ter sobrecarga de informação [16] [17].

A utilização exclusiva do TDMA não é um método de acesso eficiente em grandes cidades ou outros sítios bastante populosos e com elevadas ocorrências de transmissão de dados e voz [9].

2.2.2 FDMA – Frequency Division Multiple Access

O FDMA caracteriza-se por cada utilizador estar ligado a uma portadora. Este tipo de sistema é também o utilizado nos sistemas analógicos [16].

Na Figura 2.6 tem-se um esquema ilustrativo do funcionamento do FDMA.

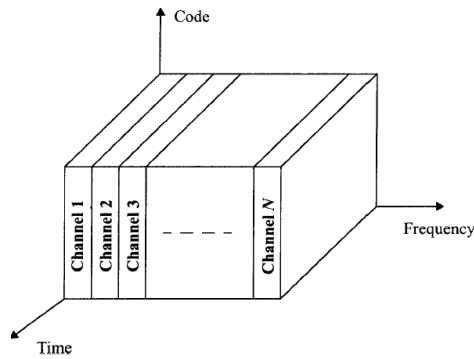


Figura 2.6 – Representação do sistema de funcionamento do FDMA [16].

Ao contrário do TDMA, O FDMA permite uma transmissão contínua, tem baixa interferência intersimbólica e normalmente não apresenta sobrecarga de informação, no entanto, necessita da utilização de filtros *duplex*, e os *handovers* costumam ser perceptíveis [16] [17].

2.3 UMTS – Universal Mobile Telecommunications Systems

O inegável sucesso da segunda geração dos sistemas de comunicações móveis levou ao desenvolvimento da tecnologia UMTS ou vulgarmente chamada 3G. Esta tecnologia, comparativamente ao 2G permite uma taxa de transferência de dados muito superior [18].

A chegada do UMTS permitiu a realização das primeiras videochamadas, visto que até então a velocidade de transmissão não era suficiente para este tipo de comunicação [14].

O 3G, tal como o GPRS utiliza comutação de pacotes, que, ao contrário da comutação por circuitos, é tradicionalmente utilizada para transmissão de dados, sendo um circuito estabelecido apenas quando há informação para ser transmitida. Este tipo de comutação caracteriza-se por ocorrer *delay* até ser possível transmitir informação [14].

Opera na frequência de 2100 MHz e o múltiplo acesso é feito através da utilização de códigos, nomeadamente *Code Division Multiple Access* [16].

O CDMA baseia-se numa técnica de espalhamento do espectro, caracterizando-se por a cada utilizador estar associado um código ortogonal, ou seja, a correlação é nula. [16]

Na Figura 2.7 tem-se um esquema ilustrativo do funcionamento do CDMA.

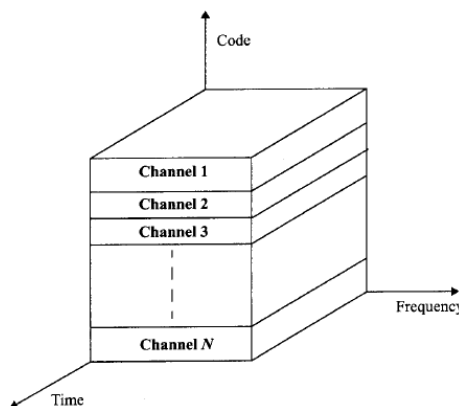


Figura 2.7 – Representação do sistema de funcionamento do CDMA [16].

Os dados do utilizador a serem transferidos são associados a um código e a esta combinação é fornecida uma portadora num modulador balanceado tal como representado na Figura 2.8.

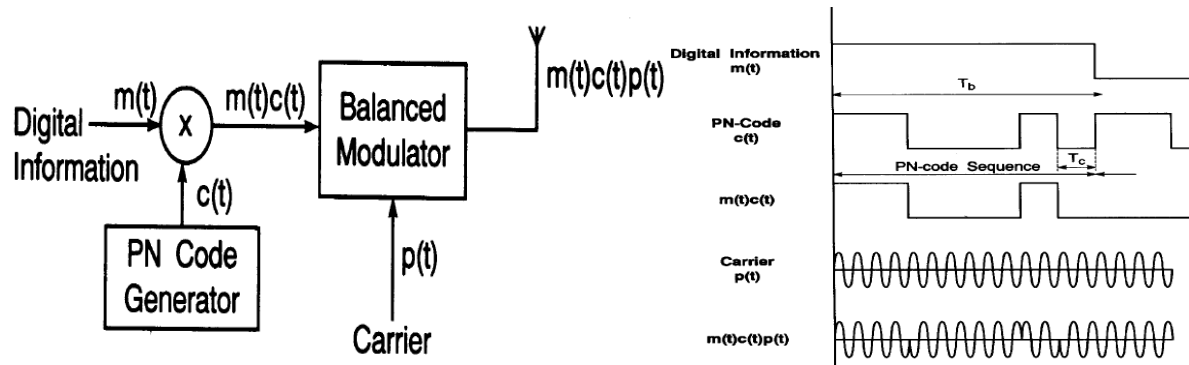


Figura 2.8 – Representação do esquemático e funcionamento do CDMA no emissor [16].

Na receção, o sistema é constituído por um gerador de códigos, um filtro passa-banda e um desmodulador, tal como representado na Figura 2.9.

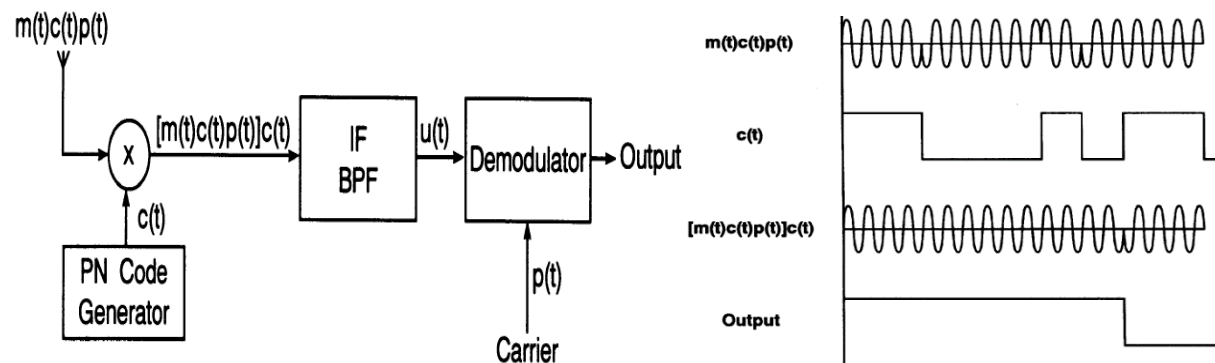


Figura 2.9 - Representação do esquemático e funcionamento do CDMA no recetor [16].

Cada palavra de código é definida como um vetor decorrendo num produto interno nulo entre os vários códigos, no entanto, os efeitos de canal por vezes levam à não-ortogonalidade entre códigos resultando em interferência, sendo esta a principal limitação deste tipo de acesso [16] [17].

Ao CDMA correspondem um número de canais infidos por cada portadora, uma largura de banda bastante elevada, reduzida sensibilidade ao *fading* e uma minorada ocorrência de sobrecarga de informação. Por outro lado, neste método de acesso múltiplo verifica-se ainda a necessidade de controlo de potência e uma elevada interferência intersimbólica, estando este fator bem como a capacidade, dependentes do utilizador [16] [17].

2.4 LTE – Long Term Evolution

Com a chegada do 4G, as redes de comunicações móveis providenciam maiores taxas de transmissão, a comutação é toda ela de pacotes e a qualidade de serviço é muito superior às tecnologias anteriores [8].

Uma das principais características do LTE é *carrier aggregation*, que é responsável pela garantia de compatibilidade entre as *release's* conforme as características da tecnologia vão evoluindo. De início (*release 8*) falava-se em 20 MHz de largura de banda com uma velocidade de transmissão de pico 300

Mb/s no *downlink* e 75 Mb/s no *uplink*. Atualmente, com o *LTE-Advanced* os valores teóricos de taxa de transmissão vão até 1 Gb/s [8].

O LTE é em Portugal utilizado em 4 possíveis bandas de frequências, nos 800 MHz, nos 1800 MHz, nos 2100 MHz e por fim nos 2600 MHz, sendo a grande diferença destas frequências a capacidade de contorno e penetração em obstáculos e a largura de banda disponível [19].

Quanto ao múltiplo acesso, este é realizado por OFDMA na ligação *downlink* e SC-FDMA na ligação *uplink*. O motivo pelo qual se utiliza métodos de acesso múltiplo distintos é tanto a diferença nos requisitos de funcionamento nos dois sentidos de transmissão bem como a distinção de equipamentos entre a BS e o móvel [20].

2.4.1 OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access

O OFDMA corresponde a uma evolução do FDMA, onde as sub-portadoras são sobrepostas visto serem ortogonais, o que significa que a sua correlação é nula e, portanto, a interferência é também nula [20]. Na Figura 2.10 tem-se representado o funcionamento do sistema OFDMA.

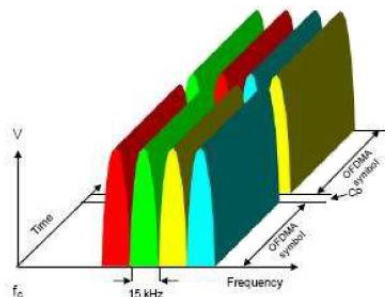


Figura 2.10 – Representação do sistema de funcionamento do OFDMA [16].

Este tipo de acesso permite ainda um melhor aproveitamento do espectro, sendo que ao estarem sobrepostas consegue-se alocar mais utilizadores, pois não há necessidade de ter espaço reservado para a *guard band*, sendo por isso uma solução bastante eficiente [16].

Comparativamente ao CDMA, este sistema tem a vantagem de apresentar escalabilidade da largura de banda e menor interferência intersimbólica [16].

2.4.2 SC-FDMA – Single Carrier Frequency Division Multiple Access

Este tipo de acesso é uma modificação do OFDMA sendo que neste caso, a transmissão de sub-portadoras é realizada sequencialmente [16]. Na Figura 2.11 tem-se representado o sistema de funcionamento do SC-FDMA.

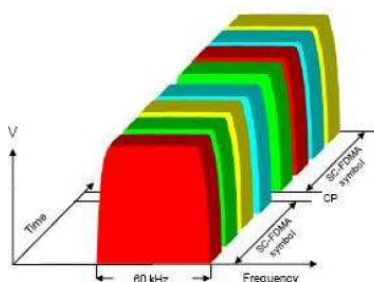


Figura 2.11 – Representação do sistema de funcionamento do SC-FDMA [16].

A largura de banda é ajustável, sendo que se aumenta ou diminui-se através do número de sub-carriers, dependendo do tipo e quantidades de dados a serem transmitidos [16].

Este tipo de transmissão torna o PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) mais reduzido que no caso do OFDMA, o que resulta num melhor e mais eficiente controlo de potência. Este facto tem ainda a vantagem de reduzir o custo de processamento visto que, a interferência intersimbólica do sinal é cancelada através de igualação adaptativa originando uma maior folga na região de funcionamento do amplificador, não necessitando este de funcionar numa região tão afastada da região que lhe garante a potência de pico [21].

Para além de todas as características apresentadas anteriormente, este tipo de acesso múltiplo tem ainda uma vantagem que, apesar de não se relacionar diretamente com as telecomunicações tem uma elevada importância no avanço da tecnologia atualmente, que é a poupança de bateria. O SC-FDMA utiliza menores quantidades de recursos energéticos, sendo por isso a opção escolhida para os terminais móveis [20].

2.5 Estimativa de Cobertura

Para se realizar uma estimativa de cobertura apenas temos em conta o *slow fading*, sendo o sinal descrito por uma distribuição *Log-Normal*. A estimativa de percentagem de cobertura é essencial e possibilita uma avaliação de qualidade de serviço [22].

A percentagem de área coberta é então dada pela equação:

$$P_{AREA} = \frac{1 + \operatorname{erf}(a) + e^{(2ab+1)/b^2} [1 - \operatorname{erf}(\frac{ab+1}{b})]}{2} \quad (2.2)$$

em que os termos “a” e “b” ambos se relacionam com o tipo de ambiente, tendo a seguinte relação:

$$a = \frac{\Delta P_{[db]}}{\sqrt{2} * \sigma_{e[db]}} \quad (2.3)$$

$$b = \frac{10a_{pd} \log(e)}{\sqrt{2} * \sigma_{e[db]}} \quad (2.4)$$

com σ_e dependente da frequência e essencialmente do tipo de ambiente de propagação, tendo este parâmetro o mesmo valor no caso de o ambiente ser rural ou suburbano e um valor diferente para ambientes urbanos [22].

2.6 Fading

O *fading* corresponde às variações no sinal recebido em transmissões reais, sendo que existem dois tipos, o *fast fading* e o *slow fading* [15]. Na Figura 2.12 encontra-se representada a potência no recetor em função da distância, influenciada pelo fading.

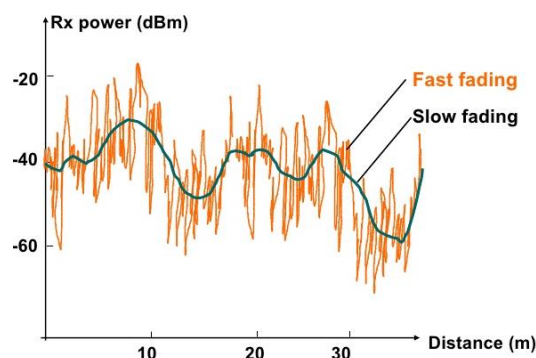


Figura 2.12 - Influência dos dois tipos de fading na potência recebida em função da distância [15].

O *slow fading* depende essencialmente da distância e é causado por obstruções no percurso dos raios [15].

O *fast fading* tem origem no multi-percurso dos raios, isto é, o sinal chega ao recetor por vários caminhos, em tempos diferentes, resultantes da difração e sucessivas reflexões, estando, portanto, essencialmente dependente do movimento do terminal. O *fast fading* tem como consequência a deformação e alargamento do sinal, provocando muitas vezes interferência intersimbólica entre impulsos adjacentes [15].

Normalmente considera-se as seguintes técnicas no combate ao fast fading [16]:

- Diminuição do ritmo de transmissão;
- Igualação adaptativa;
- Diversidade de espaço, frequência ou polarização;
- Codificação de canal.

Pode-se ainda combater o *fading* através de controlo de potência e de *handover*. No primeiro é feita uma compensação das variações de potência por parte da base station com base nos dados extraídos da monitorização dos níveis de potência transmitidos pelo móvel. Quanto ao *handover*, para esta solução ser viável é necessário que a célula vizinha esteja em melhores condições de cobertura [15].

2.7 Diversidade

Com os recorrentes problemas que a multipropagação acarreta na transmissão, a diversidade surge como opção para a transmissão com mais capacidade e com maior fiabilidade. O princípio deste sistema consiste na transmissão do mesmo sinal por diferentes percursos, reduzindo a degradação do sinal, aumentando a qualidade da ligação e diminuindo notavelmente a probabilidade de erro [15].

2.7.1 Diversidade de Tempo, Diversidade de Frequência e diversidade de polarização

Diversidade de tempo consiste na repetição do sinal no tempo sendo a transmissão feita na mesma frequência (portadora). Diversidade de frequência corresponde à transmissão do sinal no mesmo instante, mas utilizando diferentes portadoras [15].

Na Figura 2.13 tem-se uma representação do funcionamento destes dois tipos de diversidade.

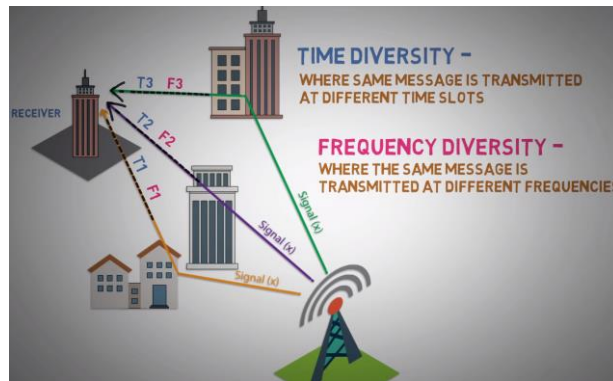


Figura 2.13 – Funcionamento dos sistemas de diversidade de tempo e diversidade de frequência [23].

Apesar destes métodos serem eficazes na minimização do *fast fading*, tanto a diversidade de tempo como a de frequência apresentam algumas limitações ou desvantagens.

A diversidade de tempo requer um intervalo entre repetições do sinal maior que o *coherence time* e necessita de um tempo relativamente elevado para completar a transmissão, o que limita a taxa de transmissão de dados [15].

A diversidade de frequência requisita uma separação entre frequências obrigatoriamente maior que a *coherence bandwidth*, necessitando, portanto, de uma elevada largura de banda. Este método de diversidade normalmente não é utilizado em comunicações devido ao custo do espectro para garantir tamanha largura de banda [15].

A diversidade de polarização é muito utilizada nas comunicações móveis, isto porque, ao se propagar no ambiente, as polarizações ortogonais têm diferentes comportamentos [9]. Os dipolos são colocados da forma ilustrada na Figura 2.14.

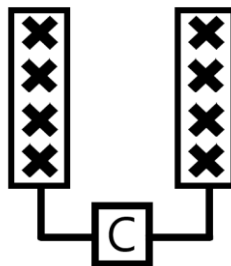


Figura 2.14 – Representação esquemática das antenas de Comunicações Móveis.

Este tipo de diversidade tem a limitação de ter um máximo de 2 sinais e requer o uso de antenas apropriadas. Nas comunicações utilizam-se dipolos com a configuração acima representada nos meios urbanos, suburbanos e nalguns meios rurais de forma a tornar a radiação diretiva, limitando a interferência com células vizinhas [9].

No caso de o ambiente ter como características uma área grande, rural e com poucos utilizadores, deixa de ser necessário utilizar antes diretivas, optando-se por antenas omnidirecionais de forma a conseguir cobrir a máxima área possível garantindo a mesma ou maior probabilidade de operacionalidade para os utilizadores comparativamente aos grandes centros urbanos [9].

2.7.2 Diversidade Espacial

A diversidade espacial é de longe o tipo de diversidade mais utilizado, isto porque apresenta bons resultados com baixos custos. As antenas podem ser configuradas na vertical ou na horizontal, mas normalmente é utilizado o espaçamento horizontal por razões meramente económicas. Na Figura 2.15 encontra-se uma representação esquemática da transmissão por diversidade espacial bem como os problemas associados à multipropagação [15].

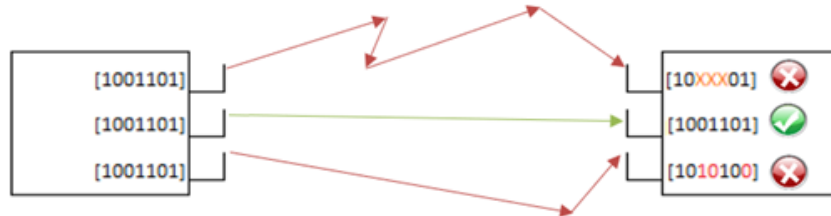


Figura 2.15 - Representação da transmissão com diversidade espacial.

Este tipo de diversidade, também chamado de MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), consiste no envio do sinal por todas as antenas sendo que cada percurso é distinto e a probabilidade de recepção aumenta com o aumento do número de antenas, isto porque as reflexões enfraquecem o sinal resultando na ocorrência de erros, incapacidade de decodificação ou muitas vezes na ausência de campo elétrico na recepção [15].

Os sistemas MIMO são também utilizados de forma a aumentar a capacidade, isto porque, segundo o teorema de *Shannon's*, todos os canais têm um limite de capacidade para uma determinada largura de banda [24].

A capacidade do canal é calculada através da expressão:

$$Capacidade_{[bit/s]} = Largura\ de\ Banda \times \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.5)$$

Sendo a largura de banda constante, a relação sinal-ruído seria o único parâmetro variável, a utilização de um tipo de modulação de ordem superior seria uma solução, no entanto o SNR teria de ser maior, o que tornaria o aumento de capacidade difícil e caro [15].

Normalmente, a opção escolhida é a multiplexagem espacial, que consiste no envio da mensagem da forma representada na Figura 2.16 [15].

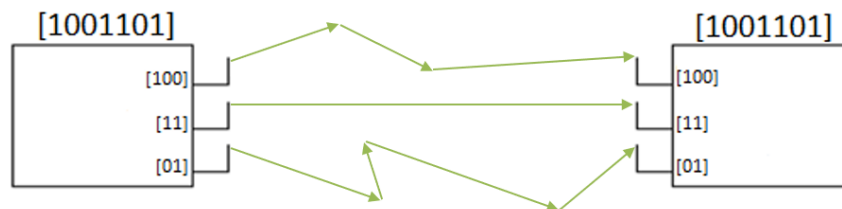


Figura 2.16 - Representação do sistema de multiplexagem espacial.

Ao contrário da diversidade espacial, na multiplexagem espacial cada parte do sinal é enviada individualmente pela sua respetiva antena, o que significa que, quanto maior o número de antenas maior será o ganho. Esta técnica é de grande interesse para transmissões de vídeos de alta resolução,

ou para outros serviços em que a elevada quantidade de dados é um requisito imprescindível, sendo por isso a utilização deste sistema em *Massive MIMO* uma previsão dada como certa na chegada do 5G. [25]

2.8 Equalizadores

Os equalizadores surgiram com o objetivo de minimizar o *spread delay*, resultante da multipropagação, causador de interferência intersimbólica [15].

Os equalizadores fazem parte dos sistemas de comunicações móveis, estando instalados no recetor, tal como representado na Figura 2.17 [15].

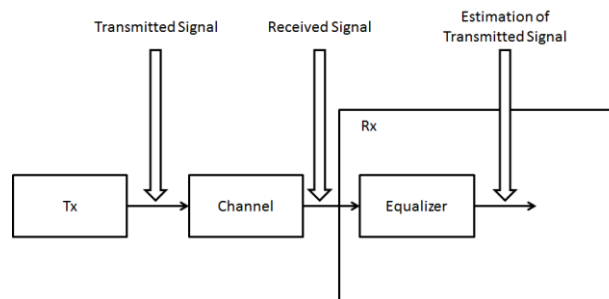


Figura 2.17 - Sistema de Comunicações com equalizador.

Vistos como filtros adaptados, desempenham um papel importante na redução da interferência intersimbólica, aumentando assim a taxa de transmissão de dados no canal. A sua função de transferência é inversa à do canal, de forma a compensar a distorção [15].

Um dos motivos pelo que ocorre interferência intersimbólica é o facto de por vezes a largura de banda do sinal da mensagem a ser enviada é superior à largura de banda do canal, o que resulta na perda de partes das componentes da mensagem que não são transmitidas pelo canal [15].

Existem vários tipos de equalizadores, sendo que a escolha tem como base a taxa de transmissão, o sistema de comunicação e o ambiente em que está inserido. Normalmente os equalizadores podem ter alguns problemas associados, tais como a sua complexidade e precisão [16] [15].

2.9 Efeito Doppler

O efeito *Doppler* corresponde ao desvio de frequência relativamente à frequência portadora de transmissão do sinal, para frequências vizinhas. Este desvio é influenciado pela velocidade do móvel, por uma relação de proporcionalidade direta [15].

A diferença de fase da onda recebida é dada por pela seguinte equação:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos(\theta) \quad (2.6)$$

Correspondendo-lhe um desvio aparente de frequência apresentado na equação:

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{V}{\lambda} \cos(\theta) \quad (2.7)$$

Este desvio de frequência resultante da velocidade do transmissor ou recetor, afeta fortemente a comunicação, levando à ocorrência de indesejáveis interferências, pondo ainda em causa a recuperação da mensagem transmitida, por parte do recetor [9].

2.10 Handover

O *handover* corresponde ao procedimento de passagem de uma célula para outra sem interrupção de comunicação. Normalmente ocorre na fronteira das células quando o sinal decresce até passar de um limite definido, passando então a estar ligada à célula vizinha. A estimativa da sua ocorrência é de grande importância, sendo uma parte vital planeamento da rede rádio [26].

Na Erro! A origem da referência não foi encontrada. tem-se a representação da ocorrência de um handover e o comportamento da potência das duas células em função da distância do móvel.

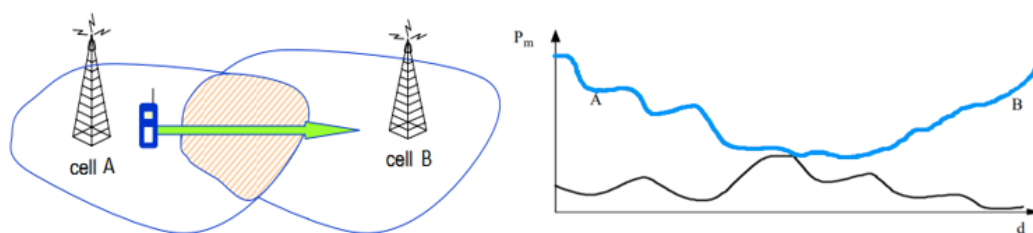


Figura 2.18 - Representação da ocorrência de handover entre duas células.

Nos sistemas de comunicações móveis ocorrem vários tipos de situações completamente diferentes em todo o tipo de ambientes, sendo que, o tratamento realizado pela rede de forma a manter ou melhorar a qualidade de serviço é tratado individualmente. O processo de troca de célula deve ser acelerado quando o valor médio do sinal decresce rapidamente ou na eventualidade do móvel estar a se movimentar a uma velocidade elevada e deve ser desacelerado na ocorrência de se estar a verificar um aumento da potência média do sinal ou quando não há nenhum canal disponível na célula vizinha [26].

O *handover* pode ser classificado como *hard*, *soft* ou *softer*, com base na ligação do móvel à *base station*. É considerado *hard* quando a chamada passa de uma célula para outra sem estar simultaneamente ligada às duas células, *soft* quando a chamada passa de uma base station para outra estando ligada às 2 células conjuntamente através de uma combinação feita pelo base station de controlo e por último, *softer* no caso em que a chamada passa de um setor para outro estando ligada aos dois setores no momento da passagem [26].

Relativamente à frequência, o handover pode ser classificado como intra ou inter sendo que no primeiro caso a chamada permanece na mesma frequência nas duas células e no segundo caso, a chamada muda de frequência na mesma célula [26].

2.11 Modulações de Transmissão

A modulação com que é feita a transmissão é de grande importância visto ser um fator que influencia diretamente a qualidade de transmissão, especificamente na ocorrência de erros (BER) e largura de banda [16].

Atualmente as comunicações móveis apresentam em todas as tecnologias modulações de sinais digitais, apresentando por isso maior imunidade ao ruído, maior segurança, capacidade de detecção e correção de alguns erros e maior robustez às condições adversas do canal [27].

A largura de banda disponível é diretamente proporcional ao índice de modulação, no entanto, a relação sinal ruído requisitada é também dependente e diretamente proporcional à largura de banda, o que muitas vezes resulta no aumento da potência de emissão ou em investimentos dispendiosos para redução do ruído [16].

Na Figura 2.19 tem-se a representação da relação da taxa de erros por símbolo com a relação sinal-ruído requisitada para a modulação QAM com diferentes índices.

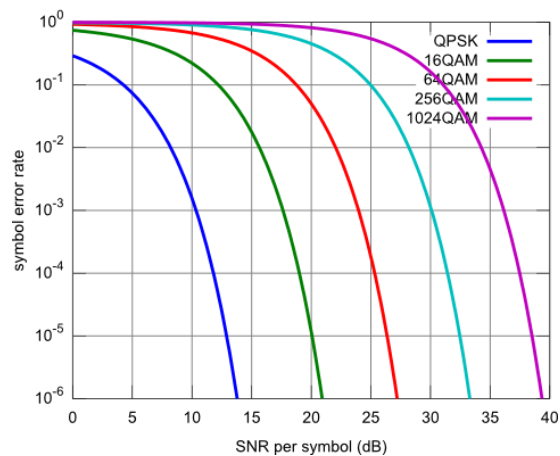


Figura 2.19 - Relação de taxa de erro por símbolo com SNR por símbolo tendo em conta o índice de modulação [15].

Verifica-se que para larguras de banda elevadas a relação sinal ruído deve ser elevada, de forma a garantir a qualidade de ligação, sendo por isso cada vez mais sensível o projeto dos sistemas conforme se sobe na frequência para aumento da largura de banda. Este é também um dos motivos pelo qual prevê-se que com a chegada do 5G e com a elevada taxa de transmissão de bits inerente ao mesmo, tanto a distância entre BS como o próprio tamanho das células serão bem mais reduzidos, evitando o quanto possível a passagem por obstáculos.

Na tabela 2.1 encontram-se as modulações utilizadas na tecnologia 2G.

Tabela 2.1 - Modulações utilizadas na tecnologia GSM [15].

	GSM DL/UL	GSM/GPRS DL/UL	GSM/EDGE DL/UL
Modulation	GMSK	GMSK	GMSK 8PSK
Bit/symbol	1	1	1, 3

Averigua-se que em todas as fases do GSM a modulação largamente mais utilizada foi a *Gaussian Minimum Shift Keying* que se baseia na modulação MSK com a adição do filtro Gaussiano, deixando de ter o problema de as bandas laterais ultrapassarem a largura da portadora com melhorias significativas ao nível de eficiência espectral ou a capacidade de sincronização automática [28].

A modulação 8PSK é também utilizada no GSM, caracterizada pela utilização definida de 3 bits por cada uma das oito fases disponíveis e pela mudança de fase para representação do sinal da mensagem [16].

Na tabela 2.2 encontram-se as modulações utilizadas na tecnologia 3G.

Tabela 2.2 - Modulações utilizadas na tecnologia UMTS [15].

	R99		R5/R6-HSPA		R7-HSPA+	
	DL	UL	DL	UL	DL	UL
Modulation	QPSK	2xBPSK	QPSK 16-QAM	2xBPSK	QPSK 16-QAM 64-QAM	QPSK 16-QAM
Bit/symbol	2	2	2, 4	2	2, 4, 6	2, 4

A modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) é uma forma simplificada da PSK (2-PSK) que utiliza duas fases separadas ou desfasadas de 180° sendo uma das fases utilizada para representar o bit '0' e a outra para representar o bit '1'. A informação da mensagem é combinada com uma portadora e à saída do modulador tem-se o sinal a transmitir com modulação BPSK [29].

A modulação QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) é também desenvolvida a partir da PSK, em que esta apresenta uma ordem maior através da adição de duas fases em relação à BPSK, possibilitando assim a transferência de 2 bits por símbolo [16].

A modulação QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), surge nas comunicações móveis na última fase do UMTS, nomeadamente no HSPA+. Este tipo de modulação caracteriza-se por ser uma combinação da modulação por fase e por amplitude, sendo capaz de oferecer condições para transmissões de alta qualidade devido à sua maior taxa de transmissão de bits. A escolha do índice de modulação depende do meio, especificamente da presença de ruído e ainda da potência do sinal [16].

Na tabela 2.3 encontram-se as modulações utilizadas na tecnologia de quarta geração.

Tabela 2.3 - Modulações utilizadas na tecnologia LTE [15].

	LTE DL/UL
Modulation	QPSK 16-QAM 64-QAM
Bit/symbol	2, 4, 6

Verifica-se que no caso do LTE, as modulações utilizadas são apenas a QPSK e a QAM, sendo esta última com índices relativamente elevados, o que é compreensível, visto que, nos dias de hoje a tecnologia 4G é a que permite maiores larguras de banda, sendo por isso a mais recomendada para videochamadas, transmissões de alta definição ou outras atividades que exijam grandes taxas de transmissão. Ao contrário da modulação BPSK ou QPSK que só utilizam as alterações de fase para diferenciar os bits, a modulação QAM utiliza a fase e ainda a amplitude, sendo cada conjunto de bits uma combinação desses dois fatores, uma espécie de coordenada [16].

2.12 Sensibilidade do Recetor

A sensibilidade do recetor corresponde ao valor mínimo de potência ao qual o terminal móvel consegue fazer a descodificação do sinal enviado pela BS [9].

Em LTE este parâmetro é calculado através da equação:

$$P_{Rxmin[dBm]} = N_{[dBm]} + M_I[dB] + \rho_N[dB] \quad (2.8)$$

O parâmetro N corresponde à potência de ruído média, M_I à margem de interferência e ρ_N à relação sinal ruído.

Nas redes LTE, o M_I toma valores entre [1,3] dB dependendo da estrutura da célula, do número de utilizadores ativos e dos serviços em execução. O ρ_N toma os valores apresentados na tabela 2.5 dependendo da modulação e do *code rate* [30].

Para o cálculo da potência de ruído média utiliza-se a equação:

$$N_{[dBm]} = -174 + 10 * \log(\Delta f_{[Hz]}) + F_{[dB]} \quad (2.9)$$

O parâmetro Δf corresponde à largura de banda do sinal, que depende do número de *sub-carriers*, multiplicando esse valor por 15 KHz, no entanto, no caso do *downlink* apenas tem-se 1 *sub-carrier* tal como visto no capítulo do estado de arte. O Δf toma então o valor de 15 000 Hz [30].

O parâmetro F corresponde à figura de ruído, que depende do terminal móvel, estando normalmente o valor entre 7 ou 8 dB [30].

Na tabela 2.5 apresenta-se o valor mínimo da relação sinal ruído para posterior cálculo da sensibilidade no recetor em LTE.

Tabela 2.4 - SNR mínimo para funcionamento dependo da modulação e do *code rate* [28].

Modulação	Code Rate	SNR [dB]
QPSK	1/8	-5,1
	1/5	-2,9
	1/4	-1,7
	1/3	-1,0
	1/2	2,0
	2/3	4,3
	3/4	5,5
16-QAM	4/5	6,2
	1/2	7,9
	2/3	11,3
	3/4	12,2
64-QAM	4/5	12,8
	2/3	15,3
	3/4	17,5
	4/5	18,6

Como seria de esperar, até pela análise feita anteriormente no capítulo 3.2, verifica-se que para modulações de ordem superior o valor do SNR requisitado é cada vez mais alto, justificando-se esse aumento para garantir uma taxa de erros num valor aceitável para a qualidade de transmissão.

3 Modelos de Propagação

Os modelos de propagação são uma ferramenta de extrema relevância, utilizada para a realização de estimativas de potência no recetor ou terminal móvel. Construídos com base em inúmeras medições realizadas em diferentes tipos de ambientes e em diferentes condições ou resultantes de aproximações à realidade, com forte dependência na resolução da base de dados geográfica e que não contam com todos os fatores, mas com a vantagem de permitir mudanças nos parâmetros facilmente, são as características que diferenciam os modelos de propagação empíricos e teóricos respetivamente [22].

A maioria dos modelos de propagação baseia-se nos dois tipos sendo que nenhum modelo se adequa a todo o tipo de ambientes e cenários e por isso têm sempre um erro associado. O erro de aproximação dos modelos de propagação é inevitável, até porque os ambientes estão constantemente a mudar, seja pela passagem de automóveis, crescimento e movimento da vegetação resultante do vento, ou mesmo pelo movimento do terminal, sendo que estes fatores contribuem para a existência de vários e diferentes percursos de reflexões [22].

A potência que chega então ao terminal móvel é definida pela seguinte expressão:

$$P_{r[dBm]} = P_{t[dBm]} + G_{t[dB]} - L_{p[dB]} + G_{r[dB]} - L_{u[dB]} \quad (3.1)$$

A potência recebida corresponde ao valor da soma da potência transmitida com o ganho de transmissão e com o ganho de receção subtraído da atenuação, que dependendo do modelo utilizado, tem diferentes expressões podendo ainda ter um acrescento de atenuações complementares resultantes de fatores existentes no ambiente de propagação [30].

O parâmetro L_u corresponde às perdas por utilizador, que no caso de a transmissão ser de voz considera-se um valor entre 3 e 10 dB e no caso da transmissão ser de dados considera-se um valor entre 0 e 3 dB [30].

A atenuação de percurso é dada pela expressão geral:

$$L_{p[dB]} = L_{ref} + 10a_{pd} \log(d_{[km]}) \quad (3.2)$$

O fator L_{ref} e o a_{pd} correspondem às perdas de referência e à queda média de potência respetivamente e ambos dependem do modelo de propagação utilizado [22].

Normalmente utiliza-se a expressão específica de cada modelo, no entanto, a equação anterior é uma representação geral da atenuação de percurso, e portanto, todas as expressões acabam por convergir para esta [30].

3.1 Modelo de Longley-Rice

Criado por *Anita Longley* e *Phil Rice*, o modelo *longley-rice*, também conhecido como *Irregular Terrain Model* (ITM) caracteriza-se por ter em conta as irregularidades do terreno, ao contrário de todos os outros modelos posteriormente apresentados. Este modelo tem como requisito de funcionamento uma frequência entre os 40 MHz e os 100 GHz e apesar de contabilizar ainda os efeitos de difração, este modelo não contabiliza as perdas em edifícios junto ao recetor nem os efeitos de multi-percurso, sendo um modelo essencialmente virado para a transmissão ponto-a-ponto. Por estas características

este modelo é mais adequado para zonas menos urbanas, até porque nestas zonas é característica a ausência de muitos edifícios e outras construções urbanísticas, no entanto, isso não implica a não utilização do modelo para simulações em zonas urbanas, devendo-se ter a noção de que o erro associado ao valor de potência obtido nas simulações apresenta um erro associado ligeiramente maior, o que é perfeitamente normal e recorrente [31].

Para além de se obter o valor do sinal na receção a simulação por este modelo, através do *software Matlab*, conjuga-se um mapa de cobertura que aliado ao cálculo do sinal através deste e dos modelos de propagação mais conhecidos na área das comunicações móveis, permite uma comparação levando a uma análise crítica mais eficaz tornando o processo de tomada de decisões mais eficaz e preciso.

3.2 Propagação em Espaço Livre

Como o próprio nome o identifica, a propagação em espaço livre é livre de qualquer tipo de obstáculos e é considerado um meio uniforme, homogéneo e isotrópico. Este tipo de propagação é característico de alguns ambientes de comunicações móveis, sendo normalmente utilizada quando a reflexão no solo é irrelevante e quando há linha de vista entre o emissor e o recetor [22].

Na seguinte equação tem-se a expressão que permite obter a potência no recetor num ambiente caracterizado por propagação em espaço livre.

$$P_{r[dbW]} = -32,44 + P_{t[dbW]} + G_{t[dbi]} + G_{r[dbi]} - 20 \log(d_{[km]}) - 20 \log(f_{[MHz]}) \quad (3.3)$$

Este modelo depende dos parâmetros das antenas, da potência transmitida, mas é essencialmente dependente da distância e da frequência [22].

Na Figura 3.1 tem-se a demonstração da dependência na frequência e distância para este modelo.

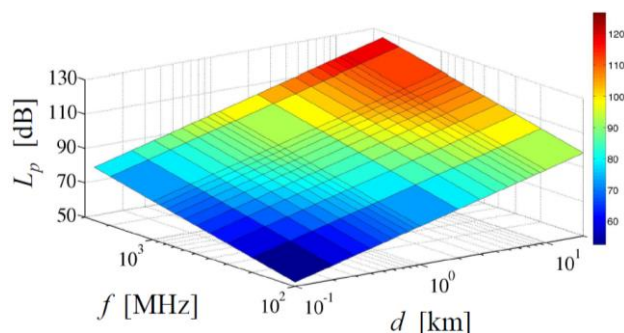


Figura 3.1 - Dependência da frequência e distância no modelo de propagação em espaço livre. [1]

Verifica-se que tecnologias que utilizam frequências mais elevadas, como é o caso do 3G, 4G e o futuro 5G são mais sensíveis nos aspetos de radiopropagação, impossibilitando por isso grandes distâncias entre as antenas do emissor e recetor [9].

3.3 Propagação em Terra Plana

Este modelo é utilizado em ambientes em que a distância de transmissão não é muito elevada, livre de obstáculos e o piso tem características aproximadamente planas. Tendo em conta a interferência resultante da interferência do raio direto com o raio refletido, este modelo é ideal para situações em

que grande parte do piso é constituído por água calma (lago, rio ou até mar) ou um piso muito pouco rugoso [22].

A expressão geral para o cálculo da potência no recetor é dada pela equação:

$$P_{[dBW]} = -120 + P_{t[dBW]} + G_{t[dBi]} + G_{r[dBi]} + 20 \log(h_{t[m]}) + 20 \log(h_{r[m]}) - 40 \log(d_{[km]}) \quad (3.4)$$

A dependência da altura das antenas é notavelmente um fator relevante neste modelo, sendo que normalmente considera-se 1,80 m como a altura média dos utilizadores [9].

Em termos de distância, para além da limitação de distância máxima, temos também a distância mínima como requisito a ser respeitado, isto porque este modelo apresenta vários máximos e mínimos relativos no campo elétrico em função da distância, no entanto, a partir de um determinado valor de distância a função campo elétrico relativo à propagação em espaço livre é dada por $1/d^4$ como se pode ver na Figura 3.2 [22].

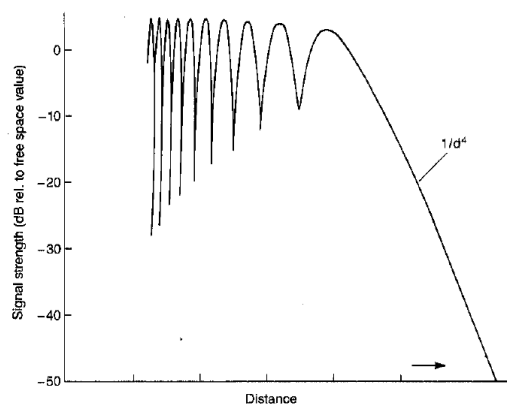


Figura 3.2 - Função do campo elétrico relativo à propagação em espaço livre em função da distância [22].

As flutuações no valor do campo elétrico em função da distância resultam da soma do sinal direto com o refletido, sendo os máximos consequentes da soma construtiva e os mínimos da contribuição destrutiva dos sinais quando em oposição de fase [22].

Relativamente às restrições de utilização do modelo, para que os valores obtidos tenham sentido, a seguinte inequação deve ser respeitada:

$$\frac{2k}{d_t + d_r} \frac{h_t d_r^2 + h_r d_t^2}{2a_{ef}} < \frac{\pi}{10} \quad (3.5)$$

Na prática, e com o objetivo de evitar a interferência do raio refletido utilizam-se diversidade de antenas diretivas e tenta-se obstruir o sinal refletido ou tentar colocar o ponto especular numa superfície rugosa, o que não é relativamente simples de executar em comunicações móveis, visto que é impossível alterar parâmetros como a altura dos utilizadores (terminal móvel) [22].

3.4 COST 231 – Modelo de Okumura–Hata

O modelo de *Okumura-Hata* foi criado com base em medidas e está projetado para um ambiente urbano com terreno plano, com uma gama de frequências entre [150, 2000] MHz. Apesar da existência destes requisitos no modelo *standard*, a adição dos fatores de correção possibilita a abrangência de muitos mais cenários em variados ambientes [9].

A equação abaixo apresentada representa a expressão matemática que permite o cálculo da atenuação de percurso média através do modelo.

$$L_{p[dB]} = 69,55 + 26,16 \log(f_{[MHz]}) - 13,82 \log(h_{be[m]}) + [44,9 - 6,55 \log(h_{be[m]})] \log(d_{[km]}) - H_{mu[dB]} - \Sigma CF \quad (3.6)$$

A altura da antena da BS é representada por h_{be} , CF o fator de correção e H_{mu} o fator de correção para a altura efetiva da antena do móvel, sendo este último dependente da área de cobertura.

O fator H_{mu} é calculado através de uma das seguintes expressões definidas na função por ramos abaixo representada.

$$H_{mu[dB]} = \begin{cases} [1,1 \log(f_{[MHz]}) - 0,7] h_{m[m]} - [1,56 \log(f_{[MHz]}) - 0,8] & (3.7) \\ 8,29 \log^2(1,54 h_{m[m]}) - 1,1 & (3.8) \\ 3,2 \log^2(11,75 h_{m[m]}) - 4,97 & (3.9) \end{cases}$$

A equação nº 3.7 é utilizado no caso de estarmos perante um cenário considerado de uma pequena cidade, sendo a 3.8 adequada para frequências até 200 MHz e a 3.9 para grandes cidades com frequências superiores a 400 MHz sendo por isso largamente mais utilizada nas comunicações móveis [22].

De seguida apresentam-se os termos que são parte integrante dos fatores de correção e que dependendo do ambiente de propagação são utilizados no modelo de *Okumura-Hata*.

Se a transmissão for ao longo de uma rua adiciona-se o fator K_{al} , que poderá ser calculado de duas formas distintas, dependendo da distância.

$$K_{al[dB]} = \begin{cases} -2,7 \log(d_{[km]}) + 8,6 & \text{se } d < 40 \text{ km} & (3.10) \\ -4,0 \log(d_{[km]}) + 10,7 & \text{se } d > 40 \text{ km} & (3.11) \end{cases}$$

No caso de a transmissão ser cruzada com a rua, acrescenta-se o fator K_{ac} cuja expressão é dada na equação:

$$K_{ac} = 2,1 \log(d_{[km]}) - 6,3 \quad (3.12)$$

Se a inclinação for um fator em ter em conta acrescentamos o termo K_{sp} , com a equação de cálculo a utilizar completamente dependente do fator de distância.

$$K_{sp}(\theta)_{[dB]} = \begin{cases} -0,0025 \theta_{[mrad]}^2 + 0,204 \theta_{[mrad]} & \text{se } d < 10 \text{ km} & (3.13) \\ -0,648 \theta_{[mrad]}^{1,09} & \text{se } d > 30 \text{ km} & (3.14) \\ -0,0012 \theta_{[mrad]}^2 + 0,840 \theta_{[mrad]} & \text{se } d > 60 \text{ km} & (3.15) \end{cases}$$

Para além dos fatores de atenuação na rua e inclinação consideramos ainda o fator ondulação do terreno, K_{th} e o fator de posição no terreno ondulado K_{hp} , sendo utilizadas as seguintes equações para os seus cálculos:

$$K_{th}(\Delta h)_{[dB]} = -3 \log^2(\Delta h_{[m]}) - 0,5 \log(\Delta h_{[m]}) + 4,5 \quad (3.16)$$

$$K_{hp}(\Delta h)_{[dB]} = -2 \log^2(\Delta h_{[m]}) + 16 \log(\Delta h_{[m]}) - 12 \quad (3.17)$$

O fator K_{th} corresponde à atenuação considerando que o terminal móvel se encontra posicionado numa zona média relativamente ao máximo e mínimo da ondulação do terreno, enquanto que o fator K_{hp} tanto pode ser positivo como negativo, dependendo da posição do móvel ser no topo da montanha, ou no fundo do vale respetivamente [22].

Se o terminal móvel estiver numa zona de múltiplos caminhos, utiliza-se uma de quatro equações apresentada na seguinte função por ramos:

$$K_{mp}(\beta)_{[dB]} = \begin{cases} -12,4 \beta^2 + 27,2 \beta & \text{se } d > 60 \text{ km} & (3.18) \\ -8,0 \beta^2 + 19,0 \beta & \text{se } d < 30 \text{ km} & (3.19) \\ 11,9 \beta^2 + 4,7 \beta & \text{se } d > 60 \text{ km} & (3.20) \\ 7,8 \beta^2 + 5,6 \beta & \text{se } d < 30 \text{ km} & (3.21) \end{cases}$$

Relativamente ao fator de correção devido aos múltiplos caminhos, as equações 3.18 e 3.19 podem ser utilizados no caso de $\beta \geq 0,8$ e as equações 3.20 e 3.21 no caso de $\beta < 0,8$ [22].

O fator de correção K_{su} corresponde a atenuação adicional no caso de o ambiente de transmissão ser suburbano.

$$K_{su}(f)_{[dB]} = 2,0 \log^2 \left(\frac{f_{[MHz]}}{28} \right) + 5,40 \quad (3.22)$$

Sendo uma área aberta, o fator de correção a utilizar é o K_{oa} dado pela equação:

$$K_{oa}(f)_{[dB]} = 4,78 \log^2(f_{[MHz]}) - 18,33 \log(f_{[MHz]}) \quad (3.23)$$

No caso de ser um ambiente característico de um meio termo entre um ambiente suburbano e um ambiente de área aberta acrescenta-se o fator K_{qo} , correspondente a uma área quase aberta, dado pela equação:

$$K_{qo}(f)_{[dB]} = K_{oa}(f)_{[dB]} - 5 \quad (3.24)$$

O desvio padrão para os ambientes urbanos, suburbanos e rurais é dado pelas seguintes equações:

$$\sigma_u(f)_{[dB]} = 0,7 \log^2(f_{[MHz]}) - 2,5 \log(f_{[MHz]}) + 11,1 \quad (3.25)$$

$$\sigma_s(f)_{[dB]} = 0,98 \log^2(f_{[MHz]}) - 3,4 \log(f_{[MHz]}) + 11,88 \quad (3.26)$$

$$\sigma_r(f)_{[dB]} = \sigma_s(f)_{[dB]} \quad (3.27)$$

3.5 Modelo de Ikegami

O modelo de *Ikegami* é um modelo teórico proposto para ambientes urbanos, especificamente para situações em que o móvel se encontra no interior de uma rua, com os prédios laterais da rua a funcionarem como guias de onda tal como representado na Figura 3.3 [22].

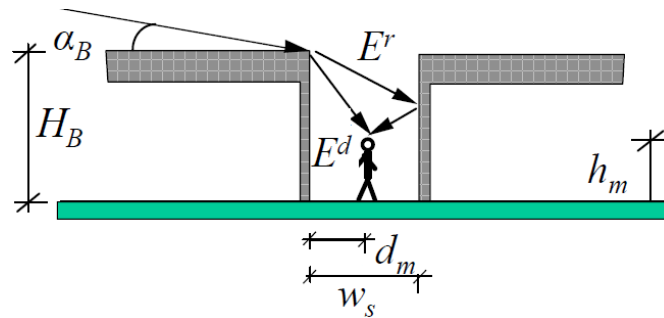


Figura 3.3 - Representação do ambiente de propagação correspondente ao modelo de Ikegami [22].

Na receção os campos elétricos dos raios refletidos e difratados são somados, sendo estes estimados pelo modelo *Knife-Edge* [22].

No centro de uma rua, a média da magnitude do campo elétrico pode ser estimada através da equação:

$$\bar{E}_{\left(\frac{dB\mu V}{m}\right)} = E_0 + 5,75 + 10 \log(1 + 3|\Gamma|^2) - 10 \log(f_{[MHz]}) + 10 \log(w_{s[m]}) - 20 \log(H_{B[m]} - h_{m[m]}) - 10 \log(\sin(\phi)) \quad (3.28)$$

Este modelo considera propagação em espaço livre desde a BS até à rua. Por este motivo, o modelo foi melhorado para ambientes não tão particulares, incluindo atenuações resultantes da obstrução do elipsoide de *Fresnel* pelo topo dos edifícios, tal como descrito nos modelos seguintes [22].

3.6 Modelo Walfisch-Bertoni

Desenvolvido em 1988 e com base teórica, o modelo de *Walfisch-Bertoni* foi projetado para a determinação da atenuação e difração características do topo dos edifícios em ambientes urbanos. [22]

Por defeito, é considerada uma estrutura urbana regular, isto é, todas as ruas e todos os edifícios têm a mesma altura, sendo a propagação feita perpendicularmente à rua, tal como representado na Figura 3.4 [22].

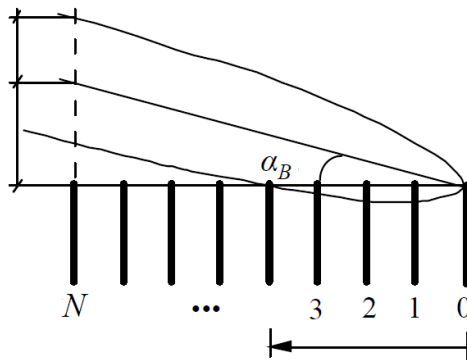


Figura 3.4 - Representação do ambiente para utilização do modelo de Walfisch-Bertoni [22].

A expressão geral das perdas para este modelo encontra-se na seguinte equação:

$$L_p[dB] = L_0[dB] + L_{rt}[dB] + L_{rm}[dB] \quad (3.29)$$

O fator L_0 representa a propagação em espaço livre desde antena até à interrupção do elipsoide de Fresnel pelos telhados dos edifícios, sendo as perdas desta interrupção contabilizadas pelo fator L_{rt} . Por fim, o fator L_{rm} responsabiliza-se pelas perdas por difração nos topos dos edifícios. À exceção da atenuação em espaço livre, estes fatores são fortemente dependentes do ângulo do elipsoide de Fresnel, do comprimento de onda, da largura da rua onde se encontra o móvel no caso do L_{rt} e dependente da altura dos edifícios, altura do móvel, ângulo do móvel com o topo do edifício e distância do topo do edifício ao móvel no caso do L_{rm} . As expressões para o cálculo destes dois fatores encontram-se representadas nas equações seguintes [22]:

$$L_{rt}[dB] = -20 \log(2,35 g^{0,9}) \quad (3.30)$$

$$L_{rm}[dB] = -20 \log \left[\frac{1}{\sqrt{\pi k \rho}} \left(\frac{1}{\psi} - \frac{1}{2\pi - \psi} \right) \right] \quad (3.31)$$

3.7 COST 231 – Walfisch-Ikegami

O modelo de *Walfisch-Ikegami* está projetado para ambientes urbanos com as características do modelo anterior (estruturas regulares) por defeito e tem como objetivo a contabilização das perdas por difração nos prédios bem como as reflexões no interior da rua onde se encontra o móvel, sendo portanto, a congregação do modelo de *Ikegami* com o modelo de *Walfisch-Bertoni* [22].

O ambiente de propagação adequado para a utilização do modelo por defeito encontra-se representado na Figura 3.5.

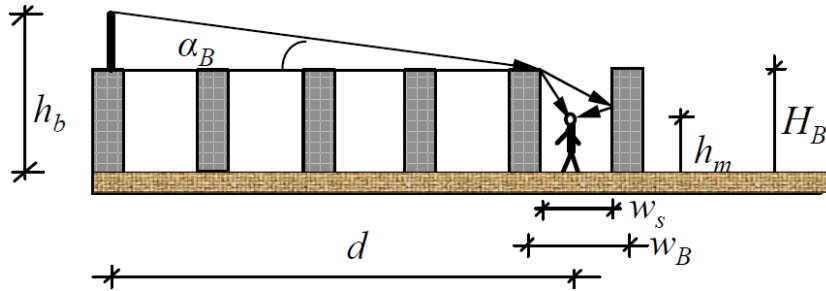


Figura 3.5 – Representação do ambiente de propagação para utilização do modelo de Walfisch-Ikegami [22].

No caso de a propagação ser com linha de vista entre o emissor e o recetor e com uma distância superior a vinte metros, utiliza-se a equação:

$$L_p[dB] = 42,6 + 26 \log(d_{[km]}) + 20 \log(f_{[MHz]}) \quad (3.32)$$

Se a transmissão for efetuada num ambiente onde não há linha de vista, a atenuação de percurso tem como expressões gerais as equações seguintes:

$$L_p[dB] = \begin{cases} L_0[dB] + L_{rt}[dB] + L_{rm}[dB] & \text{se } L_{rt} + L_{rm} > 0 \\ L_0[dB] & \text{se } L_{rt} + L_{rm} < 0 \end{cases} \quad (3.33)$$

$$L_{rt} + L_{rm} < 0 \quad (3.34)$$

Os termos L_{rm} e L_{rt} são obtidos através das equações 3.35 e 3.36, sendo o L_{rm} concernente às perdas por difração no topo dos prédios e o L_{rt} referente às perdas por reflexões no interior da(s) rua(s).

$$L_{rm}[dB] = -16,9 - 10 \log(w_{s[m]}) + 10 \log(f_{[MHz]}) + 20 \log(H_{B[m]} - h_{m[m]}) + L_{ori}[dB] \quad (3.35)$$

$$L_{rt}[dB] = L_{bsh}[dB] + k_a + k_d \log(d_{[km]}) + k_f \log(f_{[MHz]}) - 9 \log(w_{B[m]}) \quad (3.36)$$

Para o cálculo do fator L_{rm} deve-se ainda ter em conta o valor do ângulo formado entre a onda de propagação incidente e a orientação da rua, visto ser o fator que influencia a forma de cálculo do fator L_{ori} que é então dado pelas seguintes equações:

$$L_{ori}[dB] = \begin{cases} -10,0 + 0,354\varphi_{[^\circ]} & \text{se } 0^\circ < \varphi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi_{[^\circ]} - 35) & \text{se } 35^\circ < \varphi < 55^\circ \\ 4,0 - 0,114(\varphi_{[^\circ]} - 55) & \text{se } 55^\circ < \varphi < 90^\circ \end{cases} \quad (3.37)$$

$$35^\circ < \varphi < 55^\circ \quad (3.38)$$

$$55^\circ < \varphi < 90^\circ \quad (3.39)$$

O fator L_{bsh} relaciona-se com a presença das antenas da BS em cima do topo dos edifícios e é obtido através da equação:

$$L_{bsh}[dB] = \begin{cases} -18 \log(h_{b[m]} - H_{B[m]} + 1) & \text{se } h_b > H_B \\ 0 & \text{se } h_b < H_B \end{cases} \quad (3.40)$$

$$\text{se } h_b < H_B \quad (3.41)$$

O termo k_a é responsável pela contabilização do incremento da atenuação devido à presença das estações base abaixo dos telhados dos edifícios próximos.

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{se } h_b > H_B \\ 54 - 0,8(h_{b[m]} - H_{B[m]}) & \text{se } d \geq 0,5 \text{ km} \\ 54 - 1,6(h_{b[m]} - H_{B[m]})d_{[km]} & \text{se } d < 0,5 \text{ km} \end{cases} \quad (3.42)$$

$$54 - 0,8(h_{b[m]} - H_{B[m]}) \quad \text{se } d \geq 0,5 \text{ km} \quad (3.43)$$

$$54 - 1,6(h_{b[m]} - H_{B[m]})d_{[km]} \quad \text{se } d < 0,5 \text{ km} \quad (3.44)$$

O termo k_d e k_f relacionam-se com a dependência do L_{rt} na distância e frequência, e calculam-se, no caso do k_d através das equações nº 3.45 ou nº 3.46 e no caso do k_f as equações nº 3.47 ou nº 3.48.

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{se } h_b > H_B \\ 18 - 15 \frac{h_b - H_B}{H_B} & \text{se } h_b < H_B \end{cases} \quad (3.45)$$

$$18 - 15 \frac{h_b - H_B}{H_B} \quad \text{se } h_b < H_B \quad (3.46)$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0,7 \left(\frac{f_{[MHz]}}{925} - 1 \right) & \text{urbano e suburbano} \\ -4 + 1,5 \left(\frac{f_{[MHz]}}{925} - 1 \right) & \text{urbano denso} \end{cases} \quad (3.47)$$

$$-4 + 1,5 \left(\frac{f_{[MHz]}}{925} - 1 \right) \quad \text{urbano denso} \quad (3.48)$$

Quanto aos requisitos de utilização do modelo, a frequência utilizada deve ser entre 800 e 2000 MHz, a distância entre 20 metros e 5 quilómetros, a altura da antena entre 4 e 50 metros e o terminal móvel entre 1 e 3 metros [22].

Uma utilização fora dos intervalos requisitados não deixa de fazer sentido, no entanto, é necessário ter a noção de que o desvio-padrão do resultado é maior, podendo em alguns casos chegar aos 7 dB, o que torna a introdução do valor de potência na BS um processo mais complexo, e imprevisível [9].

3.8 Fatores de Atenuação Complementar

Dependendo do meio de propagação, por vezes é necessário considerar fatores de atenuação complementar, a existência de obstáculos numa posição bastante favorável à ocorrência de uma atenuação consideravelmente elevada como por exemplo montanhas ou um edifício a obstruir o elipsoide de Fresnel. Devemos ainda ter em consideração a existência de vegetação, não só pelas suas características físicas (bloqueiam o sinal como qualquer outro obstáculo), bem como pelas características químicas (podem ser modeladas como dielétricos) [22].

3.8.1 Modelo do Knife-Edge

O modelo do *Knife-Edge* é utilizado quando, durante e entre a transmissão encontram-se obstáculos com dimensões muito superiores ao comprimento de onda, sendo estes aproximados por um ecrã semi-infinito opaco (fio de uma navalha), alinhado com a aresta de difração do edifício [10].

As simplificações para este modelo podem parecer pouco realistas e de certa forma exageradas, no entanto, é um facto que os campos distantes perto das sombras geométricas são pouco afetados pela curvatura dos obstáculos [9].

A equação subsequente permite calcular a atenuação introduzida pelo obstáculo através do modelo do *Knife-Edge*:

$$L_{ke[dB]} = 6,4 + 20 \log(v + \sqrt{v^2 + 1}) \quad \text{se } v > -0,8 \quad (3.49)$$

O parâmetro v está relacionado com a altura do obstáculo, a distância de comunicação, a distância do transmissor ao obstáculo, a distância do obstáculo ao receptor e por fim a frequência de operação. A expressão para o cálculo do parâmetro v encontra-se representada na equação seguinte:

$$v = h \sqrt{\frac{2d}{\lambda d_t d_r}} \quad (3.50)$$

Ao calcular este parâmetro, se o valor obtido for menor ou igual a -0,8 considera-se que não existe atenuação imposta pelo obstáculo, visto esta ter um valor não significativo, podendo, portanto, ser excluído dos cálculos [32].

Apesar deste modelo ser adequado para a presença de obstáculos, não é correto utilizá-lo em zonas urbanas, com grande densidade de prédios, visto que o móvel está na grande maioria das vezes em zonas próximas dos obstáculos, não respeitando portanto a limitação da região de Fresnel [32].

3.8.2 Influência da Vegetação

A vegetação, comumente presente nos ambientes rurais é outro fator de atenuação que é também contabilizada, visto ter algum peso na redução da potência do sinal, não só pelas suas propriedades dielétricas como também, e principalmente por obstruir a transmissão [22].

De seguida apresentam-se as equações que permitem o cálculo das perdas por influência da vegetação.

$$L_{v[dB]} = \begin{cases} 0,063 f_{[MHz]}^{0,284} d_{v[m]} & \text{se } 0 \leq d_{v[m]} \leq 14 \\ 0,187 f_{[MHz]}^{0,284} d_{v[m]}^{0,588} & \text{se } 14 \leq d_{v[m]} \leq 400 \end{cases} \quad (3.51)$$

O termo d_v corresponde à distância efetiva, isto é, a distância a partir da qual a primeira árvore interrompe o elipsoide de Fresnel até ao terminal móvel, tal como representado na Figura 3.6.

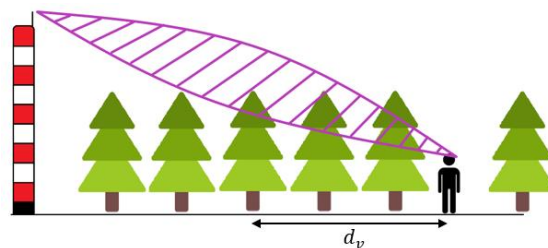


Figura 3.6 - Representação da propagação com existência de vegetação.

Realizando uma análise às equações e à figura, verifica-se que com o aumento da frequência as perdas são maiores, o que já seria de esperar, visto que, quanto menor o comprimento de onda, mais estreito e diretivo é o elipsoide de *Fresnel*, ficando por isso uma maior percentagem do elipsoide interrompida.

3.9 Cobertura em Interiores

O uso generalizado de telemóveis levou à necessidade de investigação da propagação em ambientes interiores bem como à contabilização da atenuação introduzida pelas paredes na radiação vinda do exterior, nomeadamente das estações-base. Os modelos de propagação estudados até então,

não contabilizam esta atenuação, existindo duas formas de se contabilizar as perdas, por modelos semi determinísticos ou por modelos estatísticos [9].

Por modelos semi determinísticos, em que as características do material de construção dos edifícios, número de paredes cruzadas e outros parâmetros são contabilizados [22].

Por modelos estatísticos, em que a atenuação adicional é tomada em função da percentagem de locais indoor a serem cobertos, considerando características gerais de um edifício [22].

Quando estamos perante um caso de propagação em ambiente interior, considera-se a seguinte equação:

$$L_{pTotal[dB]} = L_{poutd[dB]} + L_{pind[dB]} \quad (3.53)$$

Verifica-se que na contabilização da atenuação total, estando o terminal móvel em ambiente interior contabiliza-se os dois tipos de atenuação [22].

Na Figura 3.7 tem-se ilustrado em maior detalhe a ocorrência de atenuação nos dois tipos de ambiente.

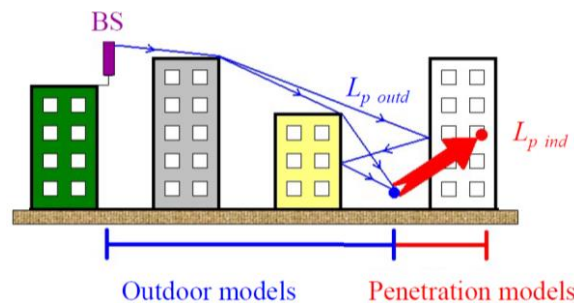


Figura 3.7 - Representação da propagação desde a BS até ao interior do edifício [22].

O sinal transmitido sofre então vários tipos de atenuação, essencialmente a reflexão no exterior e refração ao passar do ambiente exterior para o interior, através das paredes dos edifícios [22].

Um modelo estatístico para contabilização da atenuação introduzida na penetração nas paredes dos edifícios foi desenvolvido com base em medições realizadas em Lisboa, apresentando-se os seus valores na tabela abaixo. Este modelo segue uma distribuição *Log-Normal* [22].

Na tabela 3.1 tem-se o valor médio de atenuação e respetivo desvio-padrão introduzida por cada uma das bandas utilizadas nas comunicações móveis.

Tabela 3.1 - Atenuação introduzida pelos edifícios por banda segundo o modelo de Lisboa [22].

Banda [Mhz]	Valor médio [dB]	Desvio-Padrão [dB]
800	2.6	9.2
900	3.7	9.9
1800	10.2	13.8
2100	11.6	14.7
2600	13.6	15.9

Os valores acima apresentados não podem ser tomados como certos para todo e qualquer caso, até porque é apenas uma média, baseada em várias medições realizadas. O valor de atenuação introduzida está sempre essencialmente dependente da largura da parede e do material de construção desta [9].

4 Projeção Para o Futuro

A chegada da quinta geração é certamente o grande marco para o futuro próximo e que irá transformar a vida quotidiana, tanto a nível pessoal como a nível profissional, com a chegada de inúmeros desafios e oportunidades [33].

Desde o seu surgimento até aos dias de hoje, o grande objetivo das comunicações móveis é o aumento da velocidade de transmissão, no entanto, a esse objetivo, juntam-se ainda o objetivo de reduzir o atraso da transmissão da informação bem como o aumento da capacidade de conectividade entre dispositivos, e com isto engloba-se também dispositivos para além dos *smartphones* [33].

Na Figura 4.1 tem-se representadas algumas das áreas de interação da *Internet of Things* na rede 5G.

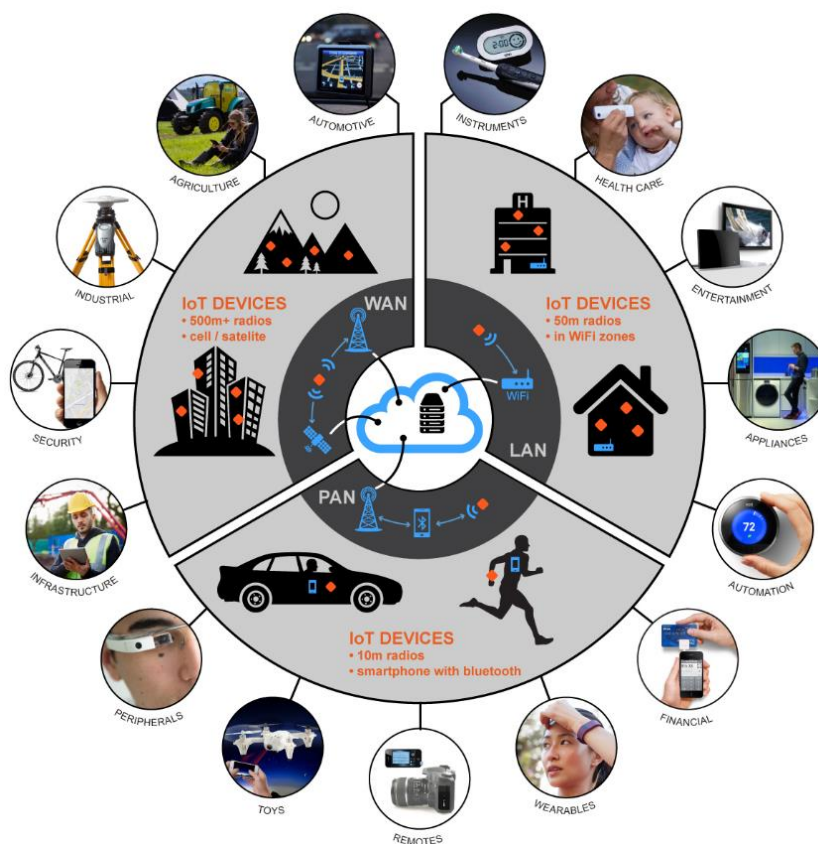


Figura 4.1 - Representação de algumas capacidades do 5G IoT [34].

Tal como se pode concluir através da análise à figura anterior, com o IoT a vida humana fica realmente bastante facilitada. Basicamente todos os dispositivos estão conectados através da internet, e o utilizador, à distância de um clique controla tudo o que interage consigo, desde aplicações na domótica, passando por sistemas como redes de sensores de deteção de incêndios conectados à internet, cirurgias e outros procedimentos médicos à distância, ou até mesmo viagens em veículos autónomos. Tudo isto traz consigo uma comodidade enorme para as nossas vidas quotidianas [35].

Outra novidade na chegada da quinta geração é a possibilidade de interação através das tecnologias de realidade aumentada, o que até agora demonstrou não ser viável no 3G ou 4G pela sua limitação nas taxas de transmissão [36].

A realidade aumentada consiste na sobreposição de informação como som, imagem e texto sobre o mundo como o vemos na realidade, estando esta tecnologia cada vez mais presente, não só em *smartphones* como também *tablets* ou até *smart glasses*, sendo que já se fala em uma alternativa mais imersiva no futuro, dispensando o recurso a estes dispositivos para disfrutar da realidade aumentada [37].

As redes 5G trarão consigo novidades como um aumento do ritmo de transmissão, da eficiência espectral, do processamento de dados, da capacidade de conexão de dispositivos e da mobilidade. Por outro lado, serão diminuídas características como o atraso de transmissão e o consumo de energia [38].

Quanto à velocidade de transmissão, através da tecnologia MIMO e tendo em conta que as frequências de operação serão bem mais elevadas que no LTE, o ritmo de transmissão será vinte vezes maior que no 4G, expectando-se atingir uma velocidade máxima de 20 Gb/s. A eficiência espectral será melhorada, especificamente no *downlink* através da tecnologia diretamente entre dispositivos (D2D), dos sistemas *full duplex* e ainda a utilização de Massive MIMO [38].

O processamento de dados será melhorado pelo D2D, pela virtualização da rede de acesso, nomeadamente o armazenamento de dados em *cloud* e pelo facto das células deterem um raio menor, permitindo um processamento de dados cem vezes superior numa determinada área, atingindo os 10 Mb/s/m² comparativamente aos 0,1 Mb/s/m² do 4G [38].

A nível de capacidade da rede, ter-se-á um aumento de densidade de dispositivos, tendo-se um aumento previsto de 900 dispositivos móveis por km². Quanto à mobilidade, as redes 4G suportavam comunicações até uma velocidade de aproximadamente 350 km/h, enquanto que, as redes 5G serão capazes de operar até uma velocidade de 500 km/h, sendo este aumento devido à utilização de uma arquitetura de rede heterogénea combinada com *handoffs* mais rápidos, isto é, será feita uma combinação entre vários tipos de células (de *pico* a *macro*) providenciando cobertura conforme a distância entre o terminal móvel e a *base station* aumenta [38].

Quanto ao atraso de transmissão, este será em média 1/5 do atraso nas redes 4G devendo-se esta melhoria à tecnologia D2D e ainda à utilização de *caches* nas proximidades, com a informação mais frequentemente requisitada pelos utilizadores levando a que estes acedam aos conteúdos de uma forma efetivamente mais rápida [38].

A nível de autonomia, um dos grandes problemas do avanço da tecnologia, prevê-se que as redes 5G transfiram os pacotes de uma forma 100 vezes mais eficiente que as redes 4G, através da utilização da tecnologia *Massive MIMO* [38].

A tecnologia MIMO será fulcral no funcionamento do 5G, pela capacidade de aumento de *bit rate* ou mesmo para diminuir as perdas de percurso, até porque as frequências utilizadas no 5G serão bem mais elevadas, o que torna mais difícil a propagação com difração de forma a contornar os obstáculos, sendo a radiação cada vez mais diretiva, levando a que as zonas de transmissão com linha de vista tenham baixa probabilidade de ter problemas de cobertura [39].

Quando um único transmissor comunica com um único dispositivo com múltiplas antenas, dá-se o nome de *Single User (SU) MIMO*, no entanto, quando um transmissor com múltiplas antenas

comunica com múltiplos recetores ao mesmo tempo chama-se *Multi User (MU) MIMO*. A utilização do sistema UM-MIMO corresponde a vários dispositivos na mesma *base station* funcionarem coordenadamente de forma a partilhar espectro por via espacial simultaneamente, dando origem ao chamado *beamforming*, resultando numa diminuição da latência e aumento da eficiência espectral [40].

Na Figura 4.2 ilustra-se o funcionamento da tecnologia *beamforming*.

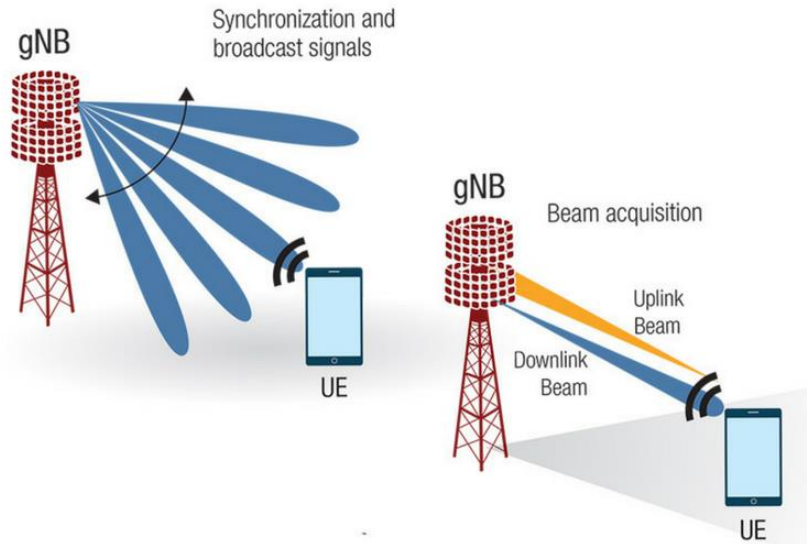


Figura 4.2 - Representação da tecnologia *beamforming* [41].

Os feixes gerados na BS são direcionados para a zona onde se encontram os terminais móveis, sendo dada prioridade nas características de qualidade de transmissão aos utilizadores que estejam a requerer mais recursos no momento, no entanto, os feixes estarão programados com algoritmos de forma a que nenhum utilizador seja prejudicado, havendo total justiça na atribuição de ritmo e qualidade de transmissão no improvável caso de todos os utilizadores estarem a requisitar a mesma largura de banda [40].

A nível do design dos equipamentos dos utilizadores, estes certamente terão um design diferente, devido ao 5G ser ainda mais complexo que o 4G. Não só o design das antenas será distinto, como também os módulos de radiofrequência, *baseband* (modem) e o PHY-MAC co-design, correspondendo este último à abordagem da arquitetura de acesso distribuído (DAA), nomeadamente a mobilização da *physical layer* e da *Media Access Control (MAC)* para a *Network Edge* [42] [43].

O facto de se utilizar ondas milimétricas, devido às bandas de funcionamento do 5G, traz inúmeros desafios, tais como, maiores perdas de propagação, maiores perdas devido ao utilizador, maiores perdas de penetração e menor capacidade de difração. É de forma a minimizar estes efeitos que surgem técnicas como o *beamforming* e *Massive MIMO*, no entanto, estas técnicas originam grandes desafios no design dos dispositivos móveis, devido ao bloqueio de sinal pelo corpo do utilizador, isto é, a forma como o utilizador segura o telemóvel influencia a atenuação de sinal [42].

Na Figura 4.3 tem-se a demonstração de vários exemplos de design com a tecnologia de *beamforming* e as limitações de propagação de sinal consequentes de cada tipo de design.

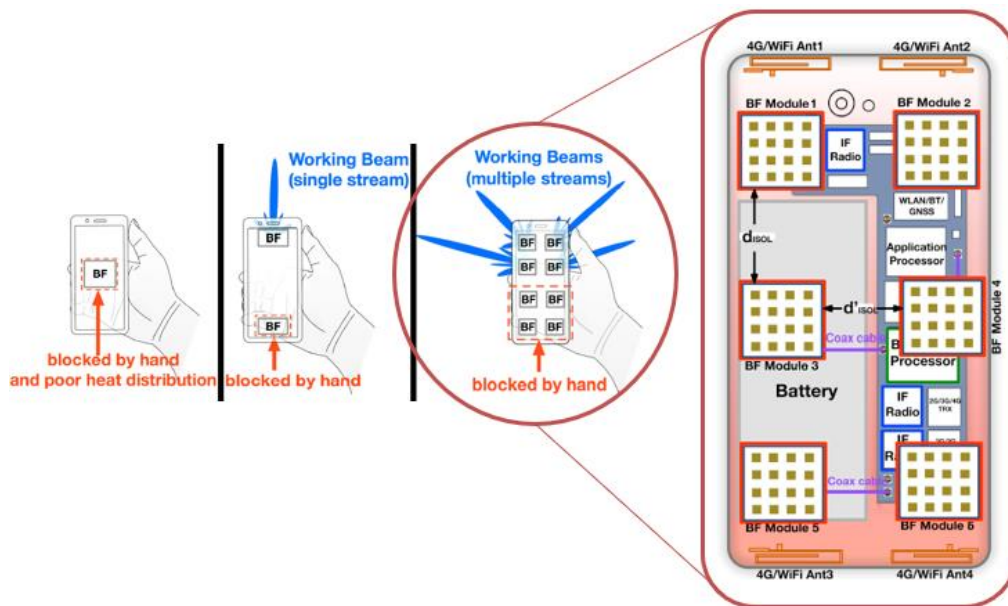


Figura 4.3 - Smartphone 5G com *beamforming* convencional, módulos BF na zona superior e inferior e arquitetura DPA-MIMO [42].

Num design convencional, tal como representado na figura anterior, mais à esquerda, o módulo de *beamforming* seria colocado num local específico, o que muito provavelmente traria adversidades, isto porque, ao segurar no dispositivo, a mão do utilizador bloquearia a propagação do sinal, o que, pelas características das ondas eletromagnéticas nestas bandas de frequência, resultaria numa atenuação na ordem dos trinta ou quarenta dB [44].

Como possibilidade de resolução do problema das perdas por utilizador, poder-se-ia pensar no design localizado a meio, na Figura 4.3. Aparentemente resolveria o problema, no entanto, continuar-se-ia a ter um grande bloqueio de sinal aquando da utilização horizontal por parte do utilizador pelo facto de normalmente segurar o telemóvel com as duas mãos, o que nos leva à terceira hipótese, localizada à direita [42].

À direita temos a arquitetura DPA-MIMO, em que os módulos de *beamforming* são distribuídos organizadamente na parte traseira do smartphone, resolvendo problema do bloqueio pelo utilizador, melhorando a dissipação de calor e a taxa de transmissão de dados, através do ganho de multiplexagem espacial [42].

Apesar da chegada do 5G ser estimada para o corrente ano (2020), a utilização efetiva por parte da maioria dos utilizadores não será para tão cedo. Segundo a organização global *Strategy Analytics* o tráfego de dados em cada uma das tecnologias será distribuído ao longo dos anos da forma representada na Figura 4.4.

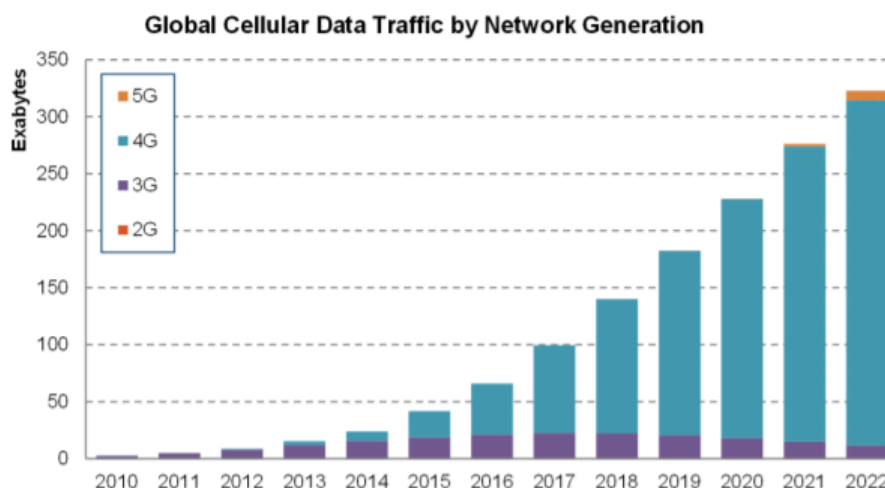


Figura 4.4 - Crescimento do tráfego de dados móveis à escala global [40].

Realizando uma análise ao gráfico acima apresentado, verifica-se que o tráfego de dados tem uma tendência de crescimento ao longo do tempo, o que de facto, comprova o facto da humanidade estar cada vez mais dependente da utilização da internet, não só para lazer, mas também para todo o tipo de comunicação, incluindo a realização de negócio como por exemplo transações comerciais, pesquisa de informação, formação pessoal, etc.

Apesar da chegada do 5G dar-se em 2020, a passagem desde as outras tecnologias para a sua utilização é gradual e, portanto, mais demorada do que se possa pensar. Segundo os analistas, o 4G é atualmente e será no futuro próximo a rede largamente mais utilizada no tráfego de dados. Na verdade, estima-se que em 2022 a rede 4G/4.5G continue a deter aproximadamente 93% do tráfego de dados móveis, no mundo [40].

Segundo o “*Mobile Economy 2019 Report*”, lançado em Barcelona, as previsões apontam que, em 2025, 15% da indústria móvel global correrá sobre a tecnologia 5G, e que ao contrário do que se possa pensar, o 4G continuará a crescer, juntamente com o 5G [45].

Atualmente ainda está a ser instalada a rede 4G em alguns países, pelo que, esta tecnologia não está nem perto de desaparecer. Previsões indicam que, até 2025 o 4G deva atingir os 60% de ligações a nível global, comparativamente aos 43% de 2018 [45].

Neste momento, dois terços da população possui um dispositivo móvel ativo, antecipa-se que nos próximos sete anos haja um crescimento de mais de 700 milhões de novos subscritores comprovando o irrefutável crescimento económico do setor das comunicações móveis bem como o grande peso deste setor na economia global [45].

5 Melhoria dos Parâmetros de Cobertura

Neste capítulo apresentam-se as medições de potência no móvel realizadas à rede real e atual em vários locais e cenários da ilha da Madeira, juntamente com uma solução de melhoria de cobertura baseada em simulações por *softwares* e cálculos através das equações descritas na secção dos modelos de propagação. Descreve-se ainda o procedimento de criação de uma célula, do ponto de vista de cobertura, sendo dado especial foco aos aspetos de propagação inerentes.

Na Tabela 5.1 tem-se representados os valores de referência para uma análise qualitativa da qualidade dos níveis de cobertura radioelétrica em GSM, UMTS e LTE, segundo a ANACOM.

Tabela 5.1 - Níveis de cobertura radioelétrica em GSM, UMTS e LTE [44].

Cobertura	GSM [dBm]	UMTS [dBm]	LTE [dBm]
Boa	$RxLev \geq -85$	$CPICH\ RSCP \geq -95$	$RSRP \geq -105$
Aceitável	$-95 \leq RxLev < -85$	$-105 \leq CPICH\ RSCP < -95$	$-115 \leq RSRP < -105$
Má	$-110 \leq RxLev < -95$	$-115 \leq CPICH\ RSCP < -105$	$-125 \leq RSRP < -115$
Inexistente	$RxLev < -110$	$CPICH\ RSCP < -115$	$RSRP < -125$

Para o estudo realizado nesta dissertação serão tomados os valores de referência de qualidade referentes ao LTE apresentados na tabela disponibilizada no relatório de qualidade de serviço realizada pela Autoridade Nacional de Comunicações.

Para a realização do estudo das zonas problemáticas teve-se ainda o cuidado de verificar e tomar em conta as frequências atribuídas a cada operador para cada os 3 tipos de rede, tanto em *uplink* como em *downlink*.

Na Tabela 5.2 apresenta-se os valores das bandas de frequências distribuídas por operador.

Tabela 5.2 - Distribuição das várias faixas de frequências [19].

Operador	Downlink		Uplink		Faixa [MHz]	Tecnologia
MEO	791,00	801,00	832,00	842,00	800	Neutralidade Tecnológica
MEO	950,90	958,90	905,90	913,90	900	GSM/UMTS/WIMAX/LTE
MEO	1845,00	1865,00	1750,00	1770,00	1800	GSM/UMTS/WIMAX/LTE
MEO	2149,90	2169,70	1959,90	1979,70	2100	UMTS
MEO	2670,00	2690,00	2550,00	2570,00	2600	Neutralidade Tecnológica
NOS	811,00	821,00	852,00	862,00	800	Neutralidade Tecnológica
NOS	943,10	950,90	898,10	905,00	900	GSM/UMTS/WIMAX/LTE
NOS	1825,00	1845,00	1730,00	1750,00	1800	GSM/UMTS/WIMAX/LTE
NOS	2130,10	2144,90	1940,10	1954,00	2100	UMTS
NOS	2650,00	2670,00	2530,00	2550,00	2600	Neutralidade Tecnológica
Vodafone	801,00	811,00	842,00	852,00	800	Neutralidade Tecnológica
Vodafone	930,00	935,00	885,00	890,00	900	GSM/UMTS/WIMAX/LTE
Vodafone	935,10	943,10	890,10	898,10	900	GSM/UMTS/WIMAX/LTE
Vodafone	1805,00	1825,00	1710,00	1730,00	1800	GSM/UMTS/WIMAX/LTE
Vodafone	2110,30	2130,10	1920,30	1940,10	2100	UMTS
Vodafone	2570,00	2595,00			2600	Neutralidade Tecnológica
Vodafone	2630,00	2650,00	2510,00	2530,00	2600	Neutralidade Tecnológica

Na tabela anterior, verifica-se que em algumas faixas de frequências não há correspondência de nenhuma tecnologia específica, sendo consideradas “Neutralidade Tecnológica”. Isto resulta de estudos efetuados ao nível da CEPT (Conferência Europeia das Administrações de Correios e Telecomunicações), refletidos em decisões da mesma e da Comissão Europeia, encontrando-se refletidos nos DUF (Direito de Utilização de Frequências) dos operadores móveis [46].

“[...] não obstante o apoio a numerosas iniciativas que visam a harmonização das utilizações do espectro radioelétrico, se considera essencial e complementar estimular a flexibilidade na utilização das frequências. Ou seja, considera-se muito importante privilegiar medidas que visem a implementação de princípios de neutralidade tecnológica e de serviços, ampliando desta forma as opções técnicas e comerciais disponíveis no mercado, tornando-o mais versátil e atrativo para os intervenientes.” [46]

Para as frequências de 900 MHz e 1800 MHz estão autorizados os sistemas identificados na tabela, sendo que, no caso de uma operadora pretender utilizar outros sistemas nestas faixas terá como requisito obrigatório do ICP-ANACOM (Instituto das Comunicações de Portugal).

5.1 Ferramentas de Medição e Simulação

Para a realização das simulações utilizou-se o *software* bastante conhecido na engenharia, o *Matlab*. Inicialmente tentou-se utilizar o *WinProp* também, no entanto, este apresenta o problema de não ter ligação a nenhuma plataforma topográfica, sendo necessária a utilização e introdução de um ficheiro baseado em cartas topográficas. Relativamente às características do terreno (edifícios, estradas, casas, etc) da ilha da Madeira, os dados facultados na *internet* apresentaram-se demasiado desatualizados, e por esse motivo optou-se pelo *Matlab* exclusivamente.

O objetivo de utilizar 2 *softwares* diferentes é a possibilidade de uma análise crítica superior, com maior quantidade de dados facilitando o processo de tomada de decisão na criação ou alteração das características das redes de acesso de modo a melhorá-las do ponto de vista de propagação rádio e cobertura.

As funções de RF utilizadas no *Matlab* têm ligação à plataforma *google maps* e tem alguns modelos de propagação disponíveis para utilizar nas simulações, nomeadamente o *free-space* para comunicações em espaço livre, sem considerar os obstáculos e o terreno, o *rain* específico para propagação com ocorrência de chuva, o *gas* para transmissões com a presença de fumo, *fog* no caso específico de uma quase constante presença de nevoeiro, *close-in* para transmissões com uma distância superior à distância de referência, sendo que, no caso da distância de transmissão ser inferior ao valor de referência este modelo não contabiliza as perdas de percurso, e por fim o modelo *longley-rice* que, pelas suas características de transmissão serem de entre as possíveis as mais próximas das transmissões comuns presentes numa rede de comunicações móveis.

Criou-se então um programa no *Matlab* em que se importou as características gerais de uma antena de comunicações móveis, de forma a colocar esta a antena nas *base stations* e através do modelo de *Longley-Rice* é simulada a propagação das ondas eletromagnéticas de forma a se averiguar que parte do território encontra-se coberta, bem como as zonas com défice de sinal. Para além deste

programa, criou-se ainda um ficheiro com o modelo de Okumura-Hata, em que o utilizador introduz os valores e o programa faz o cálculo automático da potência na receção.

Ainda que em alguns casos o valor obtido nas simulações no *Matlab* não tenham tanto valor, o facto de se conseguir gerar uma imagem com o mapa, e neste, a forma como a radiação eletromagnética se distribui no terreno é um fator importante e determinante para o ajuste dos parâmetros físicos do emissor tais como a altura da torre, os ângulos das antenas, potências de transmissão, etc.

A função *coverage* permite obter uma imagem satélite do mapa com o comportamento da radiação eletromagnética tal como representado no exemplo da Figura 5.1.

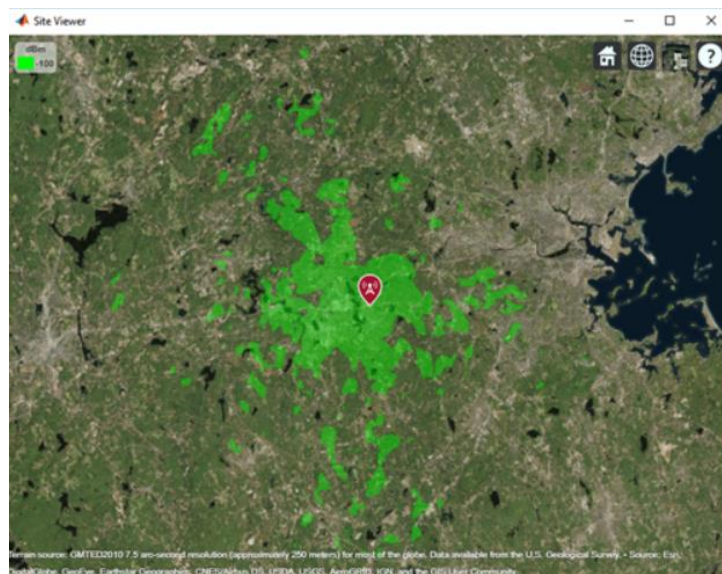


Figura 5.1 - Exemplo de utilização da função *coverage*.

Como se pode confirmar na imagem anterior, esta função permite descobrir zonas de sombra e outras zonas problemáticas sendo uma base de dados para se ajustar os parâmetros dos elementos presentes e influenciadores da propagação na célula.

Para a realização de medições decidiu-se utilizar um *smartphone* android comum utilizando a aplicação *Network Cell Info*, no entanto esta apresentou-se limitada no que toca à função de mapa, sendo que as estações-base aparecem em sítios sem qualquer significado, e, portanto, utilizou-se ainda a aplicação *Cell Tower Locator* para saber a que BS o móvel estava conectado a cada momento, de forma a ter distâncias com valores corretos. Esta aplicação ajudou ainda do ponto de vista de saber que BS estavam equipadas com LTE, porque nem todas estão, e a operadora em estudo não facultou qualquer tipo de dados.

Na Figura 5.2 encontra-se uma representação da interface e de algumas funcionalidades da aplicação de medida.



Figura 5.2 - Funcionalidades da aplicação de medida *Network Cell Info*.

A aplicação permite obter várias informações, entre as quais se destacam as mais relevantes para este estudo, nomeadamente o ID das células, os níveis de RSRP, RSSNR, RSRQ.

Através do ID das células, dividindo-se este em dois tipos de ID, o CID que é o ID da célula do ponto de vista da rede e o PCI que corresponde ao ID físico da célula, é possível ao utilizador saber a que célula está conectado, parâmetro este que deve ser o primeiro a ser consultado e imprescindível do ponto de vista de planeamento ou melhoria dos parâmetros de potências tais como o RSRP, RSSNR e RSRQ.

O parâmetro *Reference Signal Received Power* (RSRP) corresponde à potência recebida no terminal móvel em LTE e é o principal parâmetro de classificação do tipo de cobertura, estando os valores de correspondência a cada tipo de cobertura apresentados na Tabela 5.1. O *Reference Signal Signal to Noise Ratio* (RSSNR) corresponde à relação sinal-ruído do sinal de referência, sendo, portanto, mais um parâmetro de indicação de qualidade do sinal. O *Reference Signal Received Quality* (RSRQ) corresponde à classificação da qualidade do sinal, este parâmetro é ainda uma medida da relação sinal-interferente ($\frac{C}{I}$) e os seus valores normalmente variam entre -19,5 dB e -5 dB. Através do parâmetro RSRQ é possível descobrir alguns problemas na cobertura, visto que um valor muito baixo pode significar a insuficiência na cobertura no caso do RSRP ser também reduzido e por outro lado, se o valor de RSRP for elevado, mas o de RSRQ minorado, pode indicar a existência de interferência com alguma célula vizinha.

Estes três parâmetros acima apresentados são os mais importantes e permitem retirar informações extremamente relevantes sobre aspetos de radiopropagação e melhoria de cobertura radioelétrica. A interpretação da combinação dos valores resultantes nas medições permite detetar falhas na rede tais como interferências, insuficiências de cobertura ou até ocorrência de handovers indesejados.

O parâmetro *Network Interface Devices*, na aplicação “ID”, tem como função a identificação do NID ao qual a BS está ligada. Este dispositivo tem como função a garantia dos requisitos das redes LTE, desenvolvidos e instalados pelas próprias operadoras, permitem a monitorização dos dados da rede e a sua sincronização, de forma a garantir a performance da rede de acesso.

O SRV, acedível através do menu de testes de qualquer smartphone, permite aos administradores DNS a utilização de *pool* de servidores para um único domínio. Presente nas redes LTE, têm como funcionalidade nomear um ou mais *hosts* de uma rede como servidores para outros *hosts* ou de mover serviços de um *host* para o outro. O *resolver* tem a capacidade de pedir serviços ou protocolo específicos para um determinado domínio, podendo obter o chamado FQDN (*Fully Qualified Domain Names*) de qualquer um dos servidores disponíveis.

O *Timing Advance* ou simplesmente TA iniciou-se na terceira geração e tem como objetivo o controlo do *timing* de transmissão do sinal *uplink*, nomeadamente o controlo do tempo de diferença de receção dos sinais PUSCH, PUCCH e SRS (presentes nos *slots*) e o tempo de *subframe*, podendo o eNodeB enviar um comando ‘Timing Advance’ para o terminal móvel fazendo com que este altere a transmissão PUSCH/PUCCH/SRS de forma garantir o alinhamento com o *subframe timing*.

O parâmetro EARFCN, especificamente E-UTRA *Absolute Radio Frequency Number*, corresponde ao número dado à frequência portadora do sinal de *uplink* e *downlink*, podendo este variar de 0 a 65535, sendo completamente independente da largura de banda.

O parâmetro MCC (Mobile Country Code) e MNC (Mobile Network Code) combinados dão origem ao parâmetro HNI (Home Network Identity) que é basicamente a identificação do país e do operador a que o móvel está conectado. Uma forma de obter a identificação completa do utilizador do móvel é através da combinação do HNI com o MSIN (Mobile Subscriber Identification Number) originando então o IMSI (Integrated Mobile Subscriber Identity).

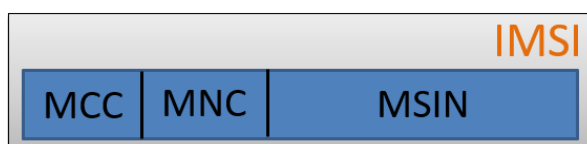


Figura 5.3 - Relação dos parâmetros MCC MNC MSIN e IMSI

O IMTE está relacionado com a banda de LTE utilizada, no caso do território português, a banda 7 corresponde ao LTE nos 2600 MHz, a banda 1 nos 2100 MHz, a banda 3 nos 1800 MHz e a banda 20 nos 800 MHz.

Por fim, o TA significa *Tracking Area* e consiste no conjunto de células associadas ao seu eNodeB numa determinada área. Associado à TA encontra-se o parâmetro TAC (*Tracking Area Code*) que corresponde ao código numérico associado a essa zona de células.

5.2 Estudo de Caso – Troço da Estrada dos Esmeraldos

Na estrada dos Esmeraldos na Ponta do Sol há um problema de cobertura em todas as tecnologias, o que dificulta não só a transmissão de dados como as próprias chamadas de voz ou sms's. Apesar das inúmeras queixas dos habitantes locais, não tem havido melhorias sendo que a

operadora MEO respondeu por correspondência que seria impossível melhorar a cobertura no local em questão.

A *base station* à qual os terminais móveis se ligam na rede 4G localiza-se no concelho da Ribeira Brava, o que, pelas condições topográficas representadas na Figura 5.4 é inteligível a dificuldade de propagação das ondas eletromagnéticas até à zona de estudo.

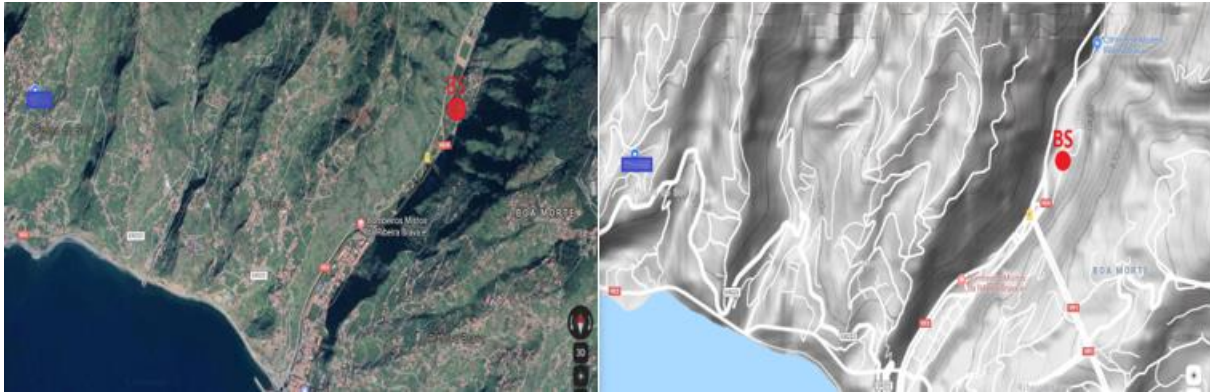


Figura 5.4 - Identificação da área de estudo e condições topográficas.

A torre na qual estão inseridas as antenas tem uma altura de aproximadamente 20 metros e encontra-se a meio do vale da Serra d'água, tendo as montanhas adjacentes aproximadamente 500 metros de altura. Para além da montanha vizinha existem ainda mais 3 montanhas com alturas relativamente elevadas que obviamente perturbam a cobertura, introduzindo atenuação.

Outra questão que ainda complica mais a garantia de cobertura é o facto deste troço se encontrar mesmo junto à montanha, sendo esta uma zona praticamente de sombra.

No decorrer das medições, apercebeu-se que apesar de na tecnologia 4G o terminal móvel se ligar à *base station* do sítio da Fajã, Ribeira Brava, na tecnologia 2G este liga-se ao *site* da Tabúa, no entanto, este facto não faz com a cobertura 2G seja muito melhor que a 4G. Na verdade, o 2G nesta área também é bastante problemático, até porque os habitantes locais estando em ambiente *indoor* só conseguem realizar chamadas de voz ou enviar sms's estando junto às janelas de casa, isto porque a atenuação introduzida pelo vidro é bem menor que a das paredes.

Na Figura 5.5 tem-se a ilustração da ligação real dos terminais móveis presentes na zona de estudo.

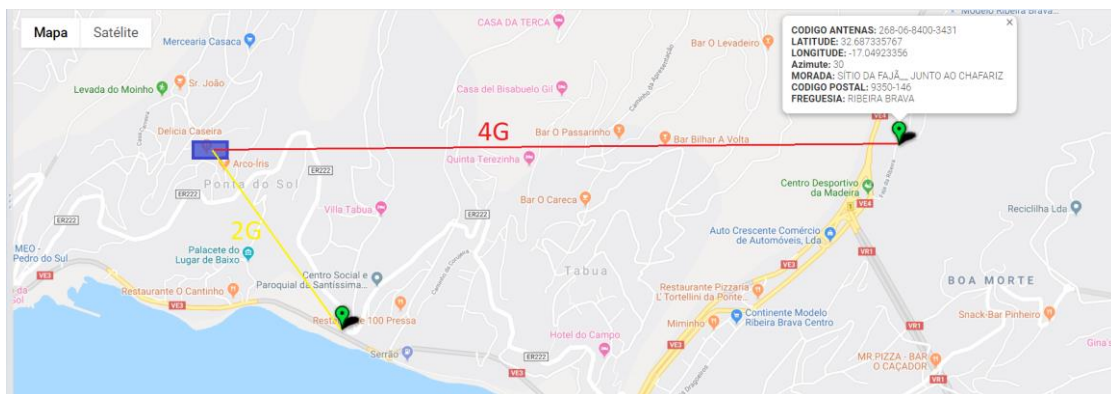


Figura 5.5 - Ilustração da ligação do terminal móvel à tecnologia 4G e 2G.

Com esta análise, verifica-se que o grande problema desta zona é ser uma zona de sombra, caso contrário a cobertura 2G era boa, o que não corresponde à verdade.

Na Figura 5.6 encontra-se representado o perfil do terreno entre a *base station* (LTE) e o terminal móvel.

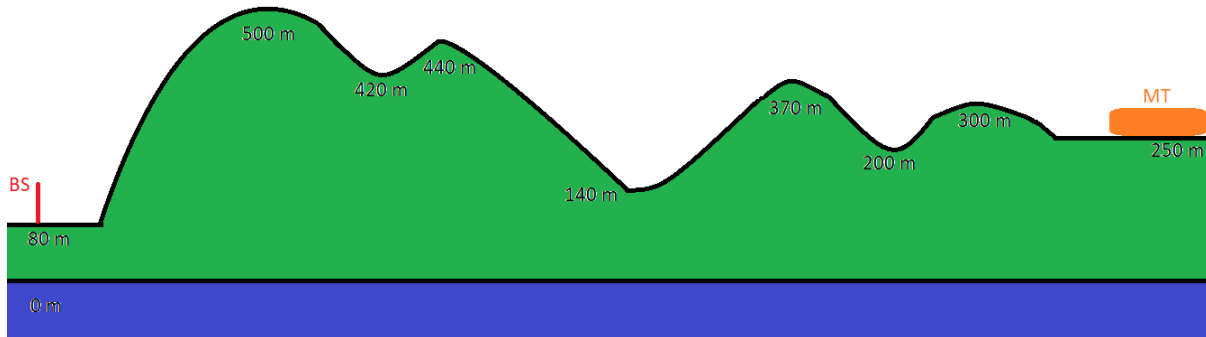


Figura 5.6 - Representação do perfil do terreno com cotas.

Ao observar a imagem, certamente se duvida da capacidade de garantir cobertura na zona onde se situa o terminal móvel, no entanto, a análise mais detalhada encontra-se nos subcapítulos seguintes.

De seguida apresentam-se as medições e simulações realizadas tanto em ambiente *outdoor* como em ambiente *indoor*.

5.2.1 Outdoor

Realizou-se a medição de potência recebida no telemóvel no centro do caminho da estrada dos Esmeraldos e o sinal recebido foi de -115 dBm tal como representado na Figura 5.7.



Figura 5.7 - Medição em ambiente exterior na Estrada dos Esmeraldos.

Para um ambiente exterior o sinal é realmente demasiado baixo, inserindo-se na categoria “aceitável”, ainda que na fronteira com a categoria “má”, a verdade é que, do ponto de vista do utilizador, a ligação é instável e muito pouco eficaz principalmente no envio de dados com dimensões relativamente elevadas, como vídeos ou imagens de alta definição.

Na imagem anterior vê-se ainda que o terminal móvel recebe sinal das células vizinhas, valores esses que até se aproximam ao sinal recebido, no entanto, o valor de RSRQ indica-nos a

impossibilidade de o problema ser interferência com células vizinhas, para isso teria de ser mais elevado.

De forma a tentar perceber o problema e tentar melhorá-lo, realizou-se uma simulação no *matlab*, bem como os cálculos através dos modelos de propagação para comunicações móveis de forma a criticar os resultados obtidos e apresentar a(s) melhor(es) proposta(s) de resolução do problema.

Previamente à realização da simulação, e até pela recusa de fornecimento de qualquer tipo de dados pela operadora, realizou-se uma passagem pelo local onde está situada a torre e verificou-se que esta tem aproximadamente 20 metros.

Para a realização do cálculo da sensibilidade no recetor utilizou-se as equações nº 2.8 e 2.9 da forma apresentada abaixo.

$$N_{[dBm]} = -174 + 10 * \log(15\ 000) + 7 = -125,24\ dBm$$

$$P_{Rxmin[dBm]} = -125,24 + 1 - 5,1 = -129,34\ dBm$$

Para o cálculo da sensibilidade considerou-se uma figura de ruído de 7 dB por ser um valor usual nos terminais móveis, para margem de interferência considerou-se 1 dB (valor mínimo) visto que a zona de estudo não é fortemente afetada pela interferência de células vizinhas, e para o valor da relação sinal ruído considerou-se o pior caso possível, que corresponde ao valor -5,1 dB.

O conjunto de dados físicos possíveis de observar bem como a previsão de dados conforme os resultados simulados encontram-se na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Parâmetros técnicos considerados nas simulações para transmissão na banda dos 800 MHz.

Parâmetros Técnicos	
Frequência	800 MHz
Altura da Torre	20 m
Potência de Emissão	60 W / 40 W
Largura de Banda	20 MHz
Ganho do Terminal Móvel	2 dBi
Figura de Ruído do Terminal Móvel	7 dB
Altura do Terminal Móvel	1,8 m
Potência de Ruído do Terminal Móvel	-93,98 dB
Sensibilidade do Recetor	-129,34 dB

Verifica-se na tabela que para o parâmetro da potência de emissão tem-se dois valores de potência. A colocação dos dois valores advém dos resultados obtidos na simulação através do modelo de *Longley-Rice* e da simulação através dos modelos de propagação para comunicações móveis, sendo estes valores uma mera previsão, sendo impossível saber o seu valor ao certo.

Através do modelo de *Longley-Rice* obteve-se o seguinte mapa de cobertura, representado na Figura 5.8.

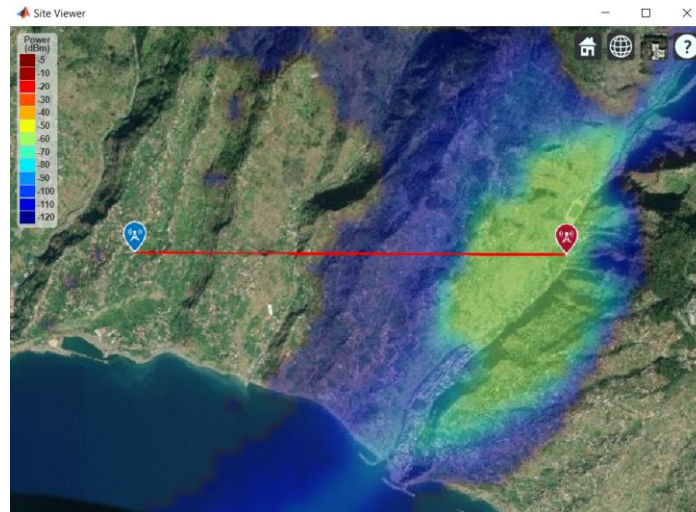


Figura 5.8 - Simulação do mapa de cobertura de potência.

Verificou-se que através desta simulação, mesmo utilizando o melhor ângulo, isto é, o ângulo no qual se atingia o maior nível de potência à receção, a cobertura da zona de estudo é praticamente nula, tornando-se, através desta análise, praticamente impossível a propagação por cima das montanhas, num processo que obviamente seria justificado por processos difractivos.

O valor obtido à receção foi de -122,87 dBm, o que, apesar de não fugir muito ao valor real medido deve muito ao valor de potência considerado na emissão, tendo sempre a incerteza do mesmo e a baixa probabilidade de se usar o valor de potência máximo. O valor insere-se na categoria de “má cobertura”, correspondendo aos relatos por parte dos residentes da zona.

Relativamente à simulação pelos modelos de propagação de comunicações móveis, optou-se pela utilização do modelo de *Okumura-Hata*, com as devidas correções. Iniciou-se por realizar uma estimativa da altura efetiva do terreno Δh para posterior utilização nas equações nº 3.16 e nº 3.17, tendo-se definido o valor de 328 metros. Este valor foi obtido considerando 80% da diferença entre altura máxima e altura mínima das montanhas. Para além deste parâmetro apenas considerou-se uma potência de 40 W, correspondente a aproximadamente 16,02 dB.

Inicialmente calculou-se o fator de correção para a altura efetiva da antena do móvel, o parâmetro H_{mu} , tendo-se considerado “*large city*” e, portanto, optou-se pela equação nº 3.19.

$$H_{mu} = 3,2 \log^2(11,75 * 1,8) - 4,97 = 0,65 \text{ dB}$$

De seguida realizou-se o cálculo do parâmetro de correção para zonas montanhosas. Considerou-se uma posição intermédia na montanha, e, portanto, utilizou-se a equação nº 3.16 da seguinte forma.

$$K_{th}(\Delta h) = -3 \log^2(328) - 0,5 \log(328) + 4,5 = -15,75 \text{ dB}$$

Com estes dois parâmetros calculados prosseguiu-se para o cálculo da atenuação de percurso, através da equação nº 3.6.

$$L_p = 69,55 + 26,16 \log(800) - 13,82 \log(20) + [44,9 - 6,55 \log(20)] \log(3,7) - 0,65 - (-15,75)$$

$$L_p = 163,28 \text{ dB}$$

Neste momento, tem-se todos os termos necessários para o cálculo da potência recebida no terminal móvel, tendo-se calculado através da expressão nº 3.1.

$$P_r = 46,02 - 163,28 + 5 + 2 - 3 = -113,26 \text{ dBm}$$

De forma a analisar e criticar os resultados obtidos, agrupou-se os valores da medição e das simulações efetuadas, na Tabela 5.4

Tabela 5.4 - Apresentação dos valores de potência recebida medida e nas simulações.

	Medição	Modelo de Propagação	Simulação Matlab
$P_r[\text{dBm}]$	-115	-113,26	-122,87

Averigua-se que o valor obtido na simulação pelo modelo de *Okumura-Hata* é mais próximo ao valor real, no entanto, para um valor maior que -115 já se considera, segundo a ANACOM, cobertura “aceitável”, o que não corresponde à realidade. Desse ponto de vista, a simulação do *matlab*, baseada no modelo de *Longley-Rice*, apesar de mais pessimista, consegue ser bem mais realista.

5.2.2 Indoor

Para além dos problemas de cobertura existentes em ambiente *outdoor*, realizou-se ainda um levantamento de dados para o ambiente *indoor*, até porque é neste ambiente que os residentes costumam basear a maioria das suas queixas.

É um facto que as paredes introduzem uma atenuação considerável pela sua espessura constituída quase que totalmente por cimento, são basicamente obstáculos. Um fator que ainda complica mais a situação é o caso do terminal móvel se encontrar no centro do imóvel, a probabilidade de a radiação ter mais paredes (obstáculos) para atravessar ou contornar é superior tanto maior for o imóvel, ou quantos mais andares este tiver.

Na Figura 5.9 encontra-se representada a medição feita no interior de uma habitação de 3 andares, realizada exatamente no centro da casa.



Figura 5.9 - Medição no interior de uma habitação na Estrada dos Esmeraldos.

Comparativamente à medição realizada no exterior, esta apresenta, como era de esperar, um valor de potência recebida inferior, especificamente -11 dBm. O valor obtido insere-se então na categoria de “Inexistente” apesar de muito próximo do valor de fronteira com a categoria “Má”.

Realmente, no interior da casa torna-se muito complicada a receção ou envio de dados na rede 4G, obrigando os utilizadores a se posicionar próximo às janelas, o que, apesar de melhorar muitas vezes a qualidade do sinal, nem sempre resolve o problema, principalmente pela incomodidade.

Segundo os modelos de propagação estudados, a diferença da presença do terminal móvel no interior traduz-se na adição de uma atenuação complementar, neste caso, por estarmos na banda dos 800 MHz, o aumento seria de 2,6 dB, resultando num valor de potência recebida no interior de -117,6 dBm.

Tabela 5.5 - Apresentação do valor medido e simulado para ambiente interior.

	Medição	Modelo <i>Indoor Propagation</i>
$P_r[dBm]$	-126,00	-117,60

Verifica-se que, segundo a ANACOM o valor medido insere-se na categoria de “Cobertura Inexistente” enquanto que o valor simulado se encontra na categoria de “Má Cobertura”.

5.2.3 Análise de Soluções

De forma a resolver este caso, no sentido de pelo menos melhorar a qualidade do sinal na zona têm-se algumas soluções, umas com maior custo que outras.

Uma seria a criação de uma estação base de raiz, provavelmente na zona mais a sul do vale, tendo a antena uma inclinação negativa, i.e., a apontar para cima na direção norte praticamente, de forma a cobrir todas as casas a partir do fundo do vale até à parte superior dos picos adjacentes, no entanto, esta solução só seria viável caso o sinal fosse inexistente, ou até mesmo não haver praticamente nenhuma torre nas redondezas, o que não corresponde à realidade. Para além disso, o custo da criação e colocação de uma estação base é obviamente elevado, não só a parte burocrática como também a própria despesa em material, mão de obra e o pagamento de licença e/ou aluguer do espaço.

Na Figura 5.10 tem-se a representação de cobertura no local através desta solução, tendo sido considerado o modelo de *Longley-Rice*.

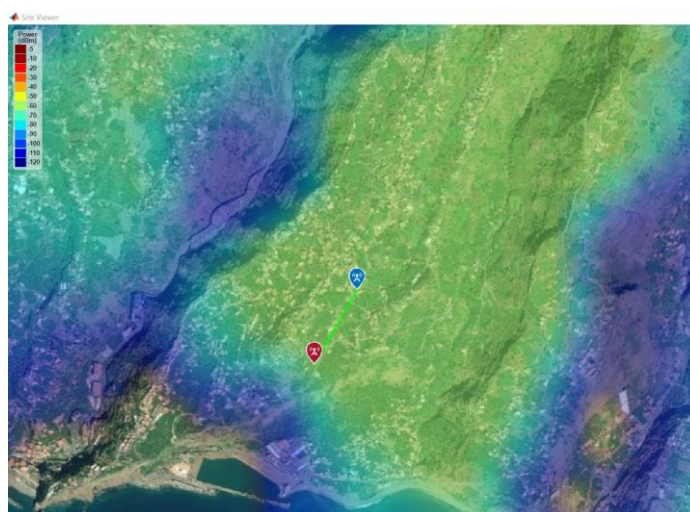


Figura 5.10 - Solução da criação de uma estação base.

Como se pode constatar, realmente a cobertura é garantida desta forma, até porque o valor de potência recebida no local estaria muito provavelmente entre os -40 dBm e os -30 dBm, o que de facto é um sinal excelente, no entanto, esta solução é duvidosa até pela exposição à radiação. Neste caso a torre tem 8 metros e a potência de emissão é de 10W, contudo, o facto de haver um número considerável de moradias por perto provavelmente torna a solução não aconselhada.

Outra solução que poderia ser considerada consiste em realizar alterações ao *site* da Tabúa, cuja localização encontra-se representada na Figura 5.5. O aumento da altura da torre bem como a inclusão de transmissão 4G representaria um custo relativamente reduzido e muito provavelmente conseguiria melhorar ainda que pouco a qualidade do sinal recebido na zona de estudo, zona esta que por ser de sombra dificilmente conseguiria ter um nível de sinal “bom” ou “muito bom”.

De facto, e como referido anteriormente, pelo sinal que é recebido em GSM verifica-se que apesar da BS estar consideravelmente mais perto do que a BS 4G da Ribeira Brava, o nível de sinal é praticamente o mesmo, sendo ligeiramente superior, o que nos leva a pensar que o problema é mesmo a zona ser de sombra.

De forma a ver a o resultado desta modificação na estação base da Tabúa realizou-se a simulação no matlab, tendo-se obtido o mapa de cobertura representado na Figura 5.11.

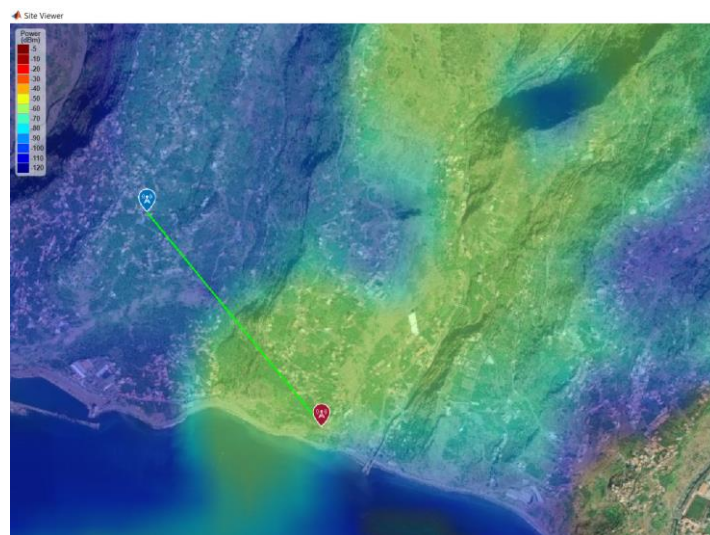


Figura 5.11 - Simulação da modificação da BS da Tabúa.

Nesta simulação considerou-se uma potência de emissão de apenas 10W, e ajustou-se o ângulo para o melhor possível de forma a maximizar o valor recebido na zona de interesse. O resultado desta simulação foi uma potência recebida de -90,85 dBm no recetor.

Para além desta simulação, realizou-se ainda o cálculo através do modelo de Okumura-Hata tendo-se obtido um valor final de -83,76 dBm.

Verifica-se que o valor simulado através do modelo de Okumura-Hata consegue ser mais otimista, contudo, ambas as simulações indicam haver viabilidade da solução.

Um aspeto que muito provavelmente torna esta solução impossível ou inviável é o aumento da altura da torre. Um aumento de 10 metros, obviamente resultaria num grande investimento por parte da operadora, até porque a base teria de ser alargada, resultando na ocupação de maior área de

terreno, terreno esse que sendo de um particular obviamente aumentaria o valor do aluguer. Para além disto a configuração das antenas teria de ser toda revista e realizada um novo Projeto de forma a garantir a cobertura aos utilizadores que na realidade estão cobertos.

Do ponto de vista económico, esta solução é, portanto, inviável, até porque o número de utilizadores que ficaria agora coberto provavelmente nunca será grande o suficiente comparativamente ao momento atual, de forma a cobrir o investimento por parte da operadora, e obviamente trazer algum lucro.

Para além das soluções já apresentadas, existe ainda a solução das *pico* ou *femto* células.

As *pico* e *femto* correspondem a pequenas células, normalmente colocadas no interior, que têm como objetivo o fornecimento de cobertura no pequeno ambiente em seu redor. Na Figura 5.12 tem-se a ilustração como exemplo de uma *pico* ou *femto* célula num ambiente de escritório.



Figura 5.12 - Demonstração de uma *pico* ou *femto* célula [47].

Esta solução, para além de ser barata tem a grande vantagem de resolver quase que instantaneamente o problema dos utilizadores, isto porque, é uma solução prática, visto que é eficaz e não necessita de colocar o cliente à espera de que a operadora resolva colocar uma estação nas redondezas.

A criação das *femto* e *pico* células é realizada através da escolha de um local para a fixação do micro repetidor, tendo este uma antena de *output* ligada numa extremidade. Na outra extremidade do módulo do micro repetidor, tem-se uma entrada *input* onde se liga um cabo que vai até à antena de *input*, estando esta localizada no exterior, longe da atenuação introduzida pelas paredes.

O procedimento impercetível que ocorre nestes dispositivos é, no caso do *downlink*, a receção do sinal de uma BS na antena de *input* do módulo, sendo o sinal amplificado e posteriormente radiado no interior da habitação pela antena de *output*. No caso do *uplink* o que ocorre é precisamente o mesmo, mas em sentido oposto.

Para esta zona de estudo, a solução mais indicada parece apontar no sentido da utilização de micro repetidores, criando as *pico* ou *femto* células no interior das habitações.

Nesta mesma zona de estudo para além das habitações em zona de sombra, existe ainda uma padaria, que iniciou a sua atividade muito recentemente. Os funcionários da padaria tinham um problema nas comunicações, nunca conseguiam receber encomendas por chamada, sendo neste caso uma questão bem mais sensível que nas habitações particulares, até porque poderia colocar em causa

o sucesso da empresa. A solução encontrada foi mesmo a colocação de um micro repetidor, criando uma *femto* célula no interior da padaria.

Tendo em conta que os funcionários da padaria são todos clientes da operadora MEO, que até ao presente momento não utiliza a tecnologia *VoLTE*, um repetidor de sinal LTE não resolveria o problema, até porque o acesso à internet estava resolvido desde início com a colocação de um router como *slave*.

A solução encontrada passou pela colocação de um repetidor de UMTS, aproveitando assim a capacidade dos telemóveis de fazer a comutação da rede ao qual se ligam por ordem de prioridades, isto é, não tendo o LTE disponível tentam ligar-se ao UMTS, não estando disponível tentam por fim ligar-se à rede GSM.

Na Figura 5.13 tem-se ilustrado o caso real da padaria “Delícia Caseira”, em que se tem o repetidor afixado a uma parede.



Figura 5.13 - Representação do caso real da padaria “Delícia Caseira”.

Verifica-se que tal como mencionado anteriormente, o aparelho tem na sua constituição a antena exterior e a interior, e tem descrito na sua estrutura “WCDMA 2100”, o que corresponde ao protocolo de conexão e frequência base respetivamente, utilizados na tecnologia 3G.

Aquando da instalação do aparelho teve-se o cuidado de verificar se a banda de frequências que o aparelho amplifica são as utilizadas em Portugal. O aparelho amplifica de 1920 MHz a 1980 MHz como *uplink* e 2110 MHz a 2170 MHz como *downlink*, incluindo portanto, a banda 3G de todas as operadoras.

Na Figura 5.14 tem-se os dados de funcionamento do repetidor.



Figura 5.14 - Apresentação dos dados de funcionamento do aparelho.

Verifica-se que o aparelho emite uma potência de 25 dBm na sua antena de *indoor*, o que, com o ganho de 75 dB, torna-se suficiente para garantir a cobertura no interior da padaria, até porque no interior da padaria não existem grandes obstáculos, resolvendo assim o problema através da garantia de ligação à rede 3G, proporcionando a opção de encomenda por telefone aos empresários.

5.2.4 Comparação Com Outra Operadora

Durante as medições anteriormente descritas, ao realizar um contacto com um habitante local, cliente da Vodafone, constatou-se que o mesmo não clamava de deficiência na cobertura, pelo que decidiu-se realizar testes de forma a verificar que disparidades existiam comparativamente à ligação da rede da MEO com os locais.

Constatou-se logo de início que a localização da *base station* é no sentido completamente oposto ao da BS da MEO. Na Figura 5.15 tem-se a localização da eNB, bem como algumas características da ligação com o terminal móvel.

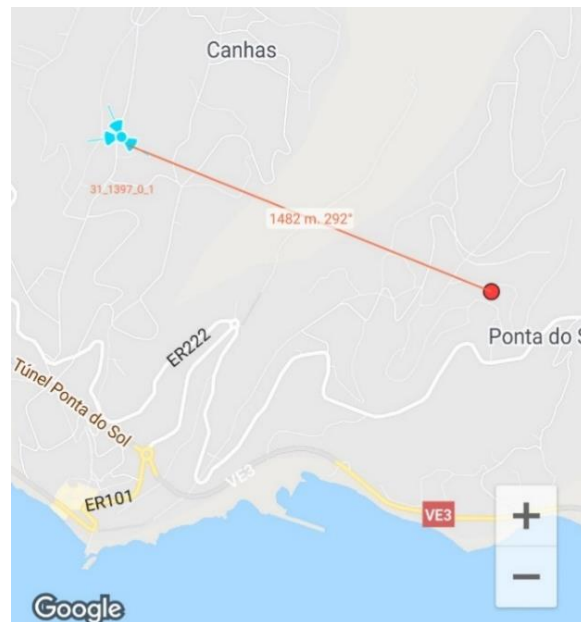


Figura 5.15 - Identificação da localização da base station da Vodafone ao qual o terminal móvel está conectado.

Verificou-se que a distância de transmissão é realmente menor do que no caso da conexão à BS da rede MEO, no entanto, isso não é suficiente para justificar a diferença nos valores de sinal recebido, pelo que para além de realizar medições de sinal, realizou-se um estudo do perfil do terreno na ligação. Tal como se suspeitava, a base station neste caso localiza-se na freguesia dos Canhas, no lado oeste do local de estudo.

Na Figura 5.16 apresenta-se então um esboço do respetivo perfil de terreno nesta ligação, bem como um *print screen* da medição de potência recebida realizada.

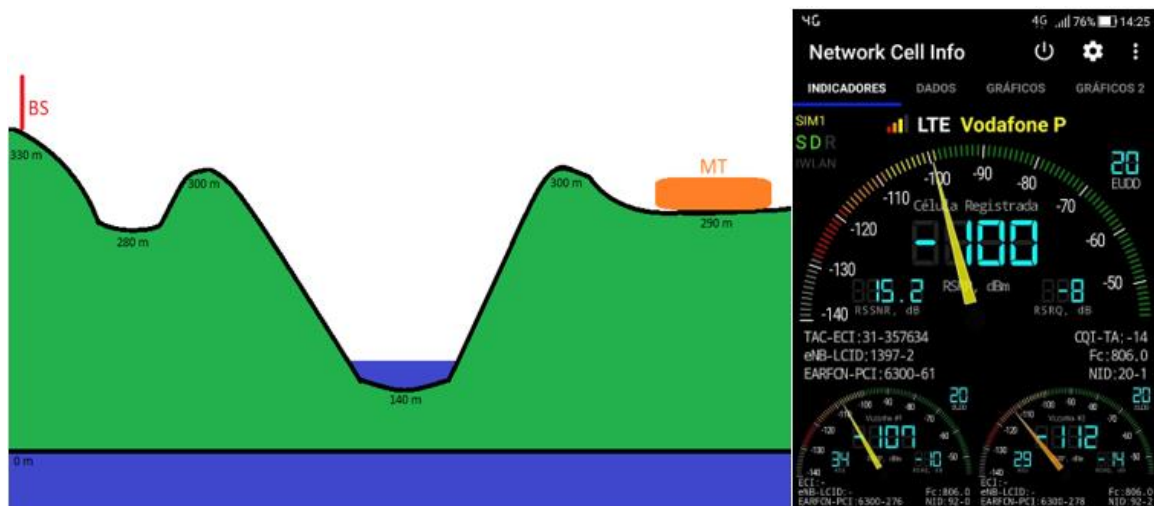


Figura 5.16 - Medição na Estrada dos Esmeraldos e representação do perfil do terreno na área de propagação.

Apesar de o valor da medição se posicionar na categoria “razoável”, a potência recebida tem uma diferença considerável comparativamente aos -115 dBm da rede da MEO. Esta melhoria é justificada essencialmente pela posição da estação, visto esta se encontrar acima das montanhas existentes no percurso, chegando ao local de estudo através de fenómenos difractivos, resultantes da presença de um pequeno pico exatamente antes do local de medição.

5.2.4.1 Indoor

Para além da medição no exterior, no centro da estrada, decidiu-se comparar também a cobertura em ambiente interior, exatamente no mesmo local que no caso da rede MEO.

Iniciou-se por verificar novamente a localização da BS conectada ao terminal móvel, através da aplicação “Cell Tower Locator”.

Na Figura 5.17 encontra-se representada a ligação entre a *base station* e o terminal móvel, estando este em ambiente *indoor*.

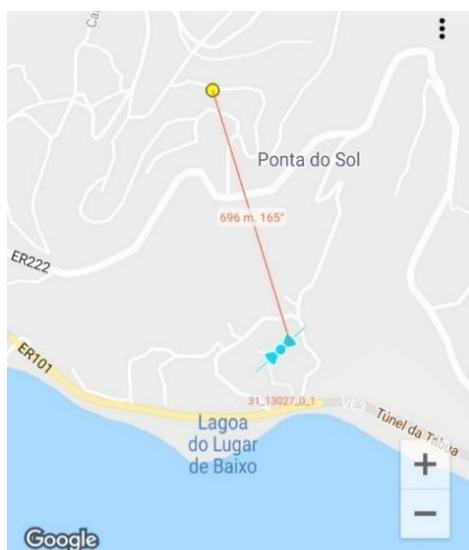


Figura 5.17 - Identificação da localização da BS conectada em ambiente interior.

Surpreendentemente, a conexão é feita com outra estação, neste caso com a estação do Lugar de Baixo, a sul da zona de estudo, tendo uma distância relativamente baixa comparativamente às anteriormente analisadas.

Este tipo de ligação é muito comum na ilha da Madeira, a torre fica numa cota mais baixa, sendo comum situar-se em zonas de vale, tendo a antena um *tilt* negativo, de forma a apontar para cima, cobrindo os moradores da zona de vale.

Realizou-se então uma análise ao perfil do terreno bem como a medição do sinal recebido no interior de um imóvel, estando estes parâmetros apresentados na Figura 5.18.

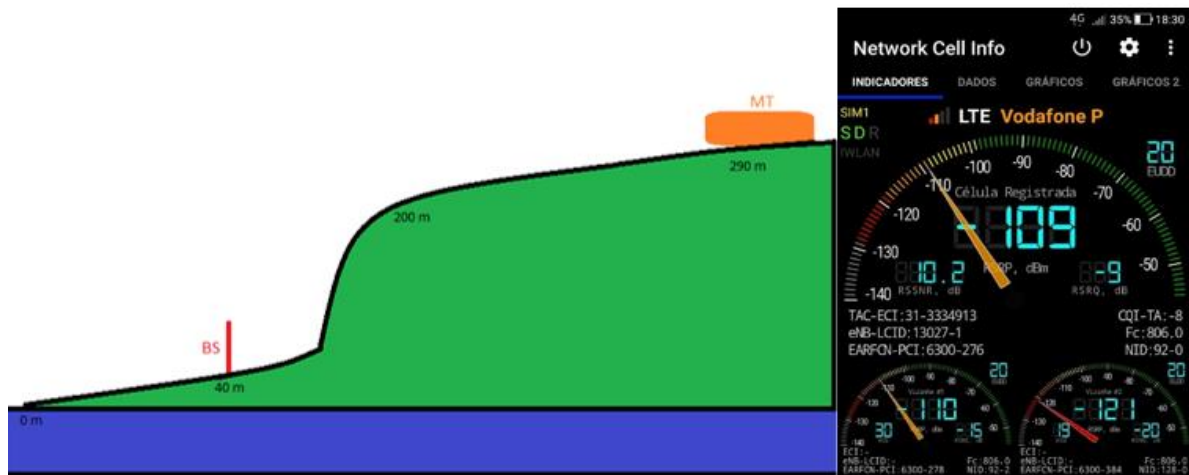


Figura 5.18 - Medição em ambiente interior e representação do perfil do terreno na área de propagação.

Confirmou-se mais uma vez a melhoria de sinal comparativamente ao registo efetuado através da medição com ligação à rede MEO. Os -109 dBm medidos, inserem-se na categoria de “má cobertura”, apesar de estar próximo à categoria “razoável”.

A razão pelo qual é feito este *handover* tem grande probabilidade de ser motivado pelas características de construção do imóvel. Como as janelas são posicionadas maioritariamente na direção sul e a atenuação provocada pelo vidro é inferior à atenuação de uma parede de blocos, é assim feita a comutação para o sinal mais forte naquele local.

O sinal recebido seria mais elevado, não fosse a subida entre o Lugar de Baixo e a Lombada tão abrupta, retirando completamente a linha de vista entre a BS e o terminal móvel, deixando uma vez mais a ligação à responsabilidade da difração ocorrente no cimo da montanha.

Quanto à potência recebida nas outras tecnologias, 2G e 3G, esta é também maior comparativamente à da MEO, pelo que a troca de chamadas e sms's deixa de ser um problema. Quanto à transferência de dados, o sinal é razoável, mas apresenta algumas flutuações, no entanto, esse não será um problema tendo uma boa rede Wi-Fi.

5.3 Estudo de Caso – Centro de Saúde da Ponta do Sol

O centro de saúde da Ponta do Sol é mais um local problemático neste concelho, merecendo uma especial atenção. O facto de ter uma sala de espera, que, como o nome indica é “de espera”, torna-se aborrecido o tempo em que os utentes e acompanhantes aguardam até serem atendidos, levando a que estes, pela própria natureza humana tentem encontrar formas de distração com objetivo

de perder a noção da passagem do tempo. Como é normal o mais esperado é utilizarem o seu *smartphone*, seja para estabelecer uma chamada com alguém, seja para utilizar a internet para consultar qualquer tipo de sites ou redes sociais. O problema neste caso reside tanto no facto de em todo o centro de saúde não haver cobertura de qualquer tecnologia da rede móvel à exceção da má cobertura da tecnologia EDGE, como na evidência de não haver qualquer tipo de *access point* com Wi-Fi disponível.

De forma a tentar perceber o motivo pelo qual a cobertura é fraca realizou-se uma medição tanto em ambiente exterior junto ao centro de saúde como interior na sala de espera do edifício, estando os resultados das mesmas nos subcapítulos subsequentes.

Na Figura 5.19 representa-se a localização da área de estudo, da BS e ainda a orografia no perímetro influente.



Figura 5.19 - Identificação da BS, zona de estudo e tipo de terreno circundante.

Neste caso específico, a *base station* não é composta por uma torre metálica com as antenas fixas na parte superior. As antenas estão assentes numa pequena estrutura, por cima da antiga esquadra da PSP da Ponta do Sol e, desta forma, aproveitando-se a sua cota evita-se despesas na fixação de uma torre no solo. A ilustração deste caso encontra-se na Figura 5.20.



Figura 5.20 - Representação da BS da antiga esquadra PSP da Ponta do Sol.

Esta BS encontra-se muito perto do mar, por esse motivo a sua cota é relativamente baixa, o que leva a que os engenheiros de projeto tivessem que dar um *tilt* negativo nas antenas, de forma a projetar o seu lóbulo de radiação desde a parte de baixo do terreno com direção às zonas mais altas, cobrindo praticamente todos os edifícios e toda a área na parte inferior do vale da Ponta do Sol.

De forma a tentar melhorar a cobertura nesta zona, especificamente no centro de saúde, realizou-se medições tanto em ambiente exterior como interior de forma a, com base em simulações encontrar possíveis soluções de resolução do problema, estando toda essa análise nos subcapítulos abaixo.

5.3.1 Outdoor

A medição em outdoor realizou-se na estrada V centenário, junto ao edifício do centro de saúde, tendo-se obtido os valores apresentados na Figura 5.21.



Figura 5.21 - Medição realizada junto ao centro de saúde da Ponta do Sol em ambiente outdoor.

Na medição realizada obteve-se o valor de -100 dBm, o que na escala definida na ANACOM é considerado “Boa cobertura”. Verificou-se ainda que a frequência de sinal era na banda do LTE800, tendo-se ainda a receção de uma célula vizinha, mas na ordem dos -127 dBm.

Ao realizar uma análise qualitativa através da visualização de vídeos de alta definição, de facto a qualidade, apesar de não ser propriamente boa, era aceitável, o que tornava este problema quase que num problema especificamente *indoor*, no entanto, e de forma a complementar o estudo realizou-se simulações de forma a verificar se de facto haveria alguma solução a implementar diretamente na configuração técnica da *base station*.

Inicialmente tentou-se recolher o máximo de dados possíveis com o intuito de tornar a simulação o mais realista possível, no entanto, como referido noutra caso, as operadores de telecomunicações evidentemente não fornecem informações técnicas e por esse motivo fez-se algumas previsões, tendo-se estes parâmetros técnicos representados na tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Parâmetros técnicos considerados nas simulações para transmissão na banda dos 800 MHz.

Parâmetros Técnicos	
Frequência	800 MHz
Altura do Emissor	15 m
Potência de Emissão	10 W
Largura de Banda	20 MHz
Ganho do Terminal Móvel	2 dBi
Figura de Ruído do Terminal Móvel	7 dB
Altura do Terminal Móvel	1,8 m
Potência de Ruído do Terminal Móvel	-93,98 dB
Sensibilidade do Recetor	-129,34 dB

Devido ao facto do programa criado no *matlab* utilizar o modelo de Longley-Rice e incluir o relevo do terreno, o valor considerado para a torre desta *base station* foi de 1 metro, isto porque a cota desde o nível da água do mar até ao telhado do edifício da esquadra já é contabilizado no programa.

Realizando-se a simulação, obteve-se o inesperado valor de -70,04 dBm, o que nem chega a se aproximar da realidade.

Na Figura 5.22 tem-se a representação da distribuição da potência radiada no terreno, desde o emissor ao recetor e arredores.

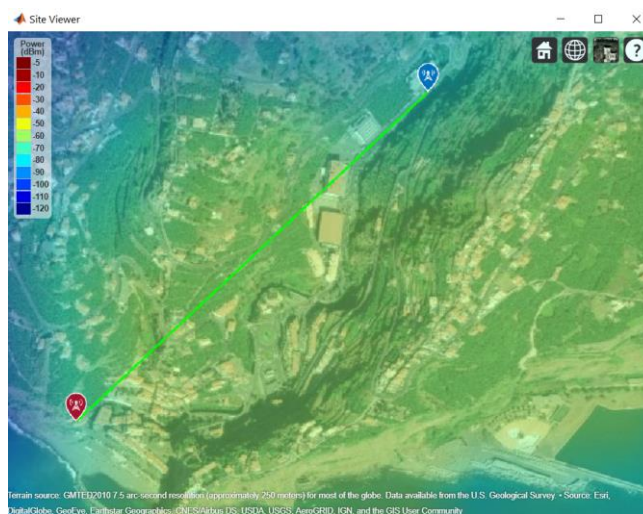


Figura 5.22 - Representação da distribuição da potência radiada no terreno.

Tanto a representação da radiação como o valor obtido são muito otimistas, o que não se verificou aquando da medição de sinal.

Passou-se à simulação através de um dos modelos de propagação de comunicações móveis, tendo-se escolhido para este caso mais uma vez o modelo de *Okumura-Hata* com as devidas correções.

Mais uma vez calculou-se o fator de correção para a altura efetiva da antena do móvel, o parâmetro H_{mu} , tendo-se considerado “*large city*” e, portanto, optou-se pela equação nº 3.9.

$$H_{mu} = 3,2 \log^2(11,75 * 1,8) - 4,97 = 0,65 \text{ dB}$$

De seguida, e por se tratar de uma pequena vila, realizou-se o cálculo do parâmetro de correção para zonas suburbanas, tendo-se utilizado a equação nº 3.22 da seguinte forma.

$$K_{su}(f) = 2,0 \log^2 \left(\frac{800}{28} \right) + 5,40 = 9,64 \text{ dB}$$

Com estes dois parâmetros calculados prosseguiu-se para o cálculo da atenuação de percurso, através da equação nº 3.6.

$$L_p = 69,55 + 26,16 \log(800) - 13,82 \log(10) + [44,9 - 6,55 \log(10)] \log(0,827) - 0,65 - 9,64$$

$$L_p = 118,22 \text{ dB}$$

Neste momento, tem-se todos os termos necessários para o cálculo da potência recebida no terminal móvel, tendo-se calculado através da expressão nº 3.1.

$$P_r = 40 - 118,22 + 5 + 2 - 3 \text{ dB} = -74,22 \text{ dBm}$$

De forma a analisar e criticar os resultados obtidos, agrupou-se os valores da medição e das simulações efetuadas, na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Apresentação dos valores de potência recebida medida e nas simulações.

	Medição	Modelo de Propagação	Simulação Matlab
$P_r[\text{dBm}]$	-100,00	-74,22	-70,04

Averigua-se que o valor obtido na simulação tanto pelo modelo de *Okumura-Hata* como pelo modelo de *Longley-Rice* são distantes do valor real medido, no entanto, tanto o valor medido como os simulados estão, segundo a ANACOM numa condição de boa cobertura. Neste caso o grande problema é mais uma vez no interior do edifício, tendo-se por esse motivo realizado uma análise mais profunda do problema, descrita no subcapítulo seguinte.

5.3.2 Indoor

Para a realização da medição em ambiente interior, tal como referido anteriormente, a zona escolhida foi a da sala de espera, visto ser a zona de maior interesse de cobertura. Na verdade, não se conseguiu realizar a medição do sinal LTE, isto porque é inexistente, tendo o terminal móvel automaticamente comutado para outra tecnologia, tal como representado na Figura 5.23.



Figura 5.23 - Medição realizada no interior do centro de saúde da Ponta do Sol.

Observando a figura verifica-se que realmente a cobertura 4G é inexistente pelo que é feita a comutação para a tecnologia EDGE, tendo à mesma um valor de sinal bastante fraco, estando por isso toda a comunidade cliente desta operadora quase 100% do tempo sem conseguir efetuar ou receber chamadas, bem como transferir dados.

Segundo os modelos de propagação para sistemas de comunicações móveis, especificamente pelo modelo de Lisboa, a atenuação introduzida pelo facto de o terminal móvel estar em ambiente interior, seria à volta de 2,6 dB com um desvio padrão de 9,2 dB. Isto porque a frequência de operação, tal como se verifica na Figura 5.21 é na banda dos 800 MHz. O valor de potência recebida seria então de -102,60 dBm.

Tabela 5.8 - Apresentação do valor medido e simulado para ambiente interior.

	Medição	Modelo <i>Indoor Propagation</i>
P_r [dBm]	-105,00 (EDGE)	-102,60 (LTE)

O valor anteriormente calculado corresponde, segundo a ANACOM a “Boa Cobertura”, o que está longe de ser verdade, até pela incapacidade do terminal móvel em realizar uma única medição do sinal LTE.

5.3.3 Análise de Soluções

Neste caso uma solução será evidentemente tomada em breve, isto porque o posto da polícia onde ainda se situa a BS está encerrado e com risco de derrocada, tendo, portanto, a operadora de fornecer uma alternativa aos clientes. O mais provável é a mudança de local, e dessa forma realizou-se uma simulação de forma a testar se o valor do sinal recebido junto ao centro de saúde seria superior, considerando o mesmo valor de potência utilizado nas simulações anteriores.

Realizou-se a simulação *matlab* com a colocação da mesma BS no topo do edifício da câmara municipal, tendo-se obtido o mapa de cobertura apresentado na Figura 5.24.

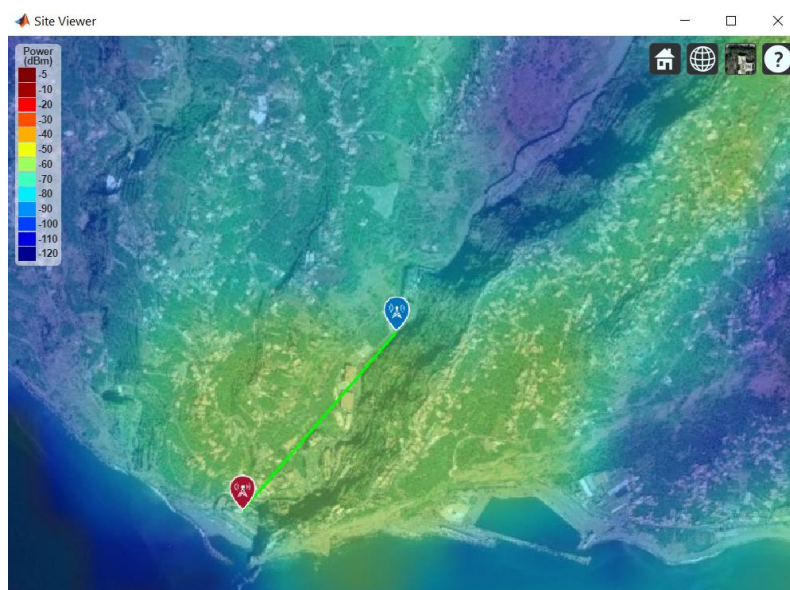


Figura 5.24 - Representação da potência radiada no mapa com a BS no edifício da câmara municipal

Realizando uma análise ao resultado da simulação, verifica-se que em praticamente todo o vale da Ponta do Sol a cobertura fica garantida, tendo-se obtido um valor de receção junto ao centro de saúde de -64,65 dBm.

O local escolhido para a colocação do *site* justifica-se pela maior facilidade de comunicação, compreensão e acordo existente entre a operadora e uma entidade pública, isto porque, a utilização de um edifício como por exemplo um bloco de apartamentos, a probabilidade de suscitar grandes questões e entraves devido à exposição à radiação eletromagnética é elevada e quase certa. Para além disso, o valor do aluguer do espaço certamente é mais reduzido do que em propriedades privadas.

Para além da mudança de local da BS, realizou-se ainda um ajuste no ângulo para a antena, tendo-se escolhido o valor de 50° neste caso, por ser o ângulo para o qual a potência recebida é máxima.

Por se tratar de um caso em que a distância desde a BS ao terminal móvel e a altura da BS serem praticamente iguais à realidade, não se achou necessário realizar a simulação através do modelo de *Okumura-Hata*, pois os resultados seriam muito semelhantes devido à proximidade nos parâmetros considerados nas equações deste modelo.

A melhoria do sinal com a mudança do local da BS muito provavelmente seria proporcional em ambiente interior, no entanto, e em caso contrário a solução poderia ser semelhante à da padaria “Delícia Caseira” anteriormente referida, passando então, pela utilização de um repetidor com uma antena exterior, amplificador e antena interior, tal como representado na Figura 5.13.

Tal como no caso da padaria, não só o sinal LTE como todos os outros são fracos no interior. Devido à não utilização da tecnologia VoLTE por parte da operadora, novamente seria necessário ter algum cuidado na escolha do repetidor, dando preferência a um repetidor de GSM ou UMTS de forma a assegurar a realização e receção de chamadas telefónicas, juntamente com a alteração da rede de internet, juntando a esta a utilização de Wi-Fi, numa rede pública através de um AP na zona da sala de espera.

A colocação de um repetidor de LTE resolveria o problema de acesso à internet, o problema é que a parte de chamadas telefónicas manter-se-ia, resultando num investimento maior por parte da entidade pública. Neste caso ter-se-ia despesa com o repetidor LTE, com outro de GSM ou UMTS e ainda, por preferência instalar conjuntamente uma rede Wi-Fi, o que não é evidentemente uma solução com o mínimo de sentido.

5.4 Estudo de Caso – AVASAD Funchal

A AVASAD, é uma empresa de tratamentos de saúde com técnicos das Ciências Médicas de Trabalho e do Desporto, localizada no Funchal, mais precisamente na rua dos Aranhas.

Este local dispõe de uma sala de espera e para além disso, o facto de ser um centro de fisioterapia e outros tratamentos, o acesso à internet é sem dúvida uma forma de conforto e de ocupação para os utentes dos serviços, principalmente em tratamentos mais demorados.

O facto de o utente estar conectado à internet é uma forma de distração fazendo parecer que o tempo passa mais rapidamente, sendo, portanto, um grande aliado a alguns tratamentos de saúde.

Na Figura 5.25 representa-se a localização das *base stations* mais próximas do centro de tratamentos, bem como algumas características da zona de estudo.

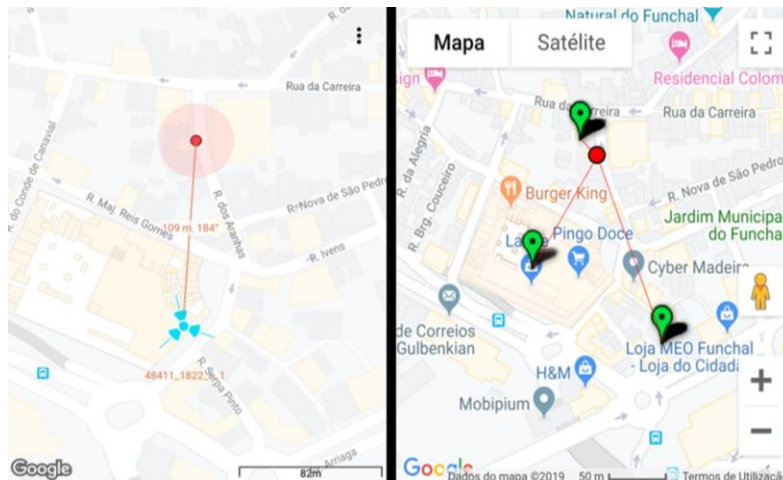


Figura 5.25 - Identificação da localização da BS e características da zona de estudo.

Através de uma visita ao local, realizou-se uma pesquisa de algumas características das BS mais próximas, tendo-se reparado que todas as três representadas na figura anterior encontram-se no topo de edifícios.

Realizando uma análise rápida e simples à parte direita da Figura 5.25, pela lógica dir-se-ia que os terminais móveis na zona da AVASAD certamente estariam ligados à estação base mais próxima, no entanto, segundo a aplicação “Cell Tower Locator” o terminal móvel conecta-se à estação base localizada por cima do centro comercial La Vie ou à existente junto à loja da MEO, na calçada de São Lourenço. Esta evidência levou à verificação do tipo de BS da BS mais próxima, tendo-se reparado que esta apenas possui um sector, estando direccionado na direção completamente oposta ao local de estudo. Na BS junto à loja da MEO acontece um caso semelhante, neste caso com a existência de dois sectores, mas nenhum direccionado para o local de estudo.

Realizou-se ainda outras medições exatamente no mesmo local num horário diferente e verificou-se que o terminal móvel estava, desta vez, conectado ao *enode-B* 6409 que é o que fica junto à loja da MEO, na rua da calçada de São Lourenço tal como representado na Figura 5.26.

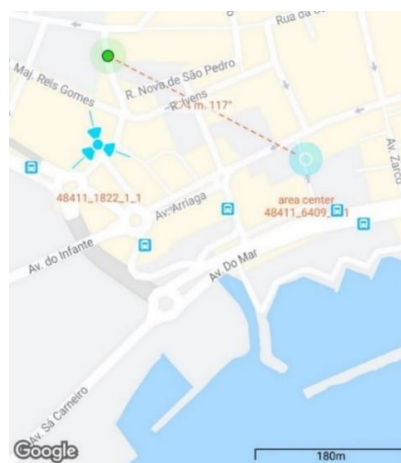


Figura 5.26 - Identificação da localização da BS conectada.

Conhecida a problemática e as algumas das suas características, passou-se então à análise em ambiente *outdoor* e *indoor*, estando estas nos subcapítulos subsequentes.

5.4.1 Outdoor

Na medição realizada no centro da rua dos Aranhas, obteve-se o resultado representado na Figura 5.27.



Figura 5.27 - Medição realizada junto à AVASAD em ambiente outdoor.

Verificou-se que neste caso, a ligação é muito boa e encontra-se bem acima do valor considerado “Bom” pela ANACOM. Verificou-se ainda que esta zona tem uma elevada tendência à ocorrência de *handovers*, variando muito entre a célula 1822 e a 6409, no entanto os valores de potência recebidos de uma e de outra são muito semelhantes.

Após observar as duas *base stations*, realizou-se uma estimativa de alguns dos parâmetros mais influentes do ponto de vista da garantia de cobertura.

Na Tabela 5.9 encontram-se os parâmetros estimados da célula número 6409.

Tabela 5.9 - Parâmetros técnicos estimados na célula 6409 e 1822.

Parâmetros Técnicos	CID - 6409	CID - 1822
Frequência	2100 MHz	2100 MHz
Altura do Emissor	8 m	13 m
Potência de Emissão	10 W	10 W
Largura de Banda	20 MHz	20 MHz
Ganho do Terminal Móvel	2 dBi	2 dBi
Figura de Ruído do Terminal Móvel	7 dB	7 dB
Altura do Terminal Móvel	1,8 m	1,8 m
Potência de Ruído do Terminal Móvel	-93,98 dB	-93,98 dB
Sensibilidade do Recetor	-129,34 dB	-129,34 dB

Com o intuito de obter algumas propostas de resolução do problema realizaram-se algumas simulações.

Inicialmente simulou-se no *Matlab* com base no modelo de *Longley-Rice*, desta forma tentou-se criar o cenário real, considerando o *eNodeB* 6409 com as características apresentadas na Tabela 5.9. Na Figura 5.28 tem-se a representação da distribuição de potência radiada no mapa

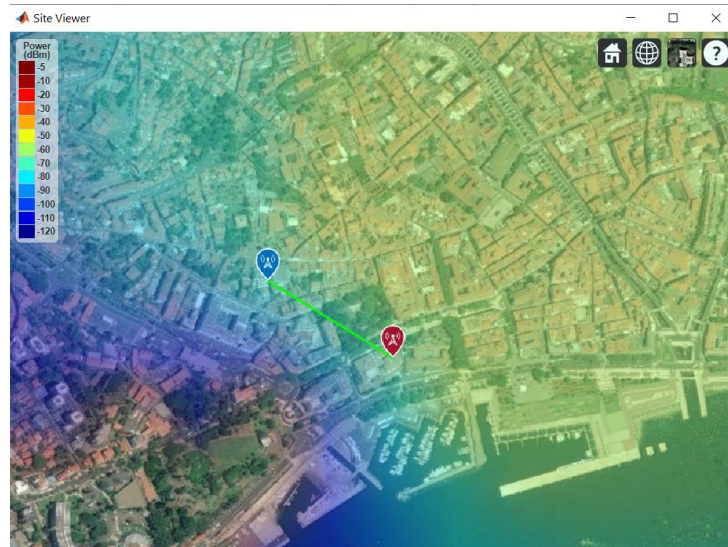


Figura 5.28 - Representação da potência radiada no mapa.

Para além das características mencionadas na tabela, considerou-se ainda um ângulo de 35° para a antena. O motivo pelo qual se considerou este ângulo e não o ângulo maximizador da potência recebida foi a elevada discrepância entre o valor real e o simulado. Com o ângulo de 35° obteve-se um valor de potência recebida de $-72,86$ dBm, o que de facto assemelha-se muito ao valor medido.

Realizou-se ainda a simulação através dos modelos de propagação específicos para comunicações móveis. Numa primeira fase decidiu-se utilizar o modelo de *Walfisch-Ikegami* por se tratar de um cenário de presença no interior de uma rua numa zona urbana bem como pela proximidade às BS redundantes, sendo portanto grande a probabilidade de a maior parte da atenuação ocorrer devido à presença dos edifícios, bem como às reflexões resultantes da localização dos mesmos na rua. Posteriormente realizou-se ainda os cálculos para a simulação pelo modelo de *Okumura-Hata*, até por este ser específico para ambientes urbanos, como é o caso deste cenário no centro do Funchal.

Sendo este um caso em que não há linha de vista entre o *eNodeB* e o terminal móvel, para calcular as perdas de percurso através do modelo de *Walfisch-Ikegami*, utilizou-se a equação nº 3.33.

$$L_p[dB] = L_0[dB] + L_{rt}[dB] + L_{rm}[dB]$$

Para determinar o valor do termo L_{rm} , correspondente à atenuação devido à difração desde o topo dos edifícios até ao terminal móvel, calculou-se o termo L_{ori} , correspondente à atenuação provocada pelo ângulo formado entre a linha direta de transmissão e a rua. Neste caso consideramos o pior caso, sendo este $\varphi = 90^\circ$, resultando, portanto, no seguinte cálculo através da equação 3.39.

$$L_{ori} = 4,0 - 0,114 (90 - 55) = 0,01 \text{ dB}$$

Obtidos todos os valores dos termos da equação 3.35 correspondente ao cálculo do fator L_{rm} , determinou-se o valor da seguinte forma.

$$L_{rm} = -16,9 - 10 \log 6 + 10 \log 2100 + 20 \log(10 - 1,8) + 0,01 = 26,83 \text{ dB}$$

De seguida calculou-se os termos necessários para posterior cálculo da atenuação extra devido à propagação através do topo dos edifícios, identificado na equação 3.33 por L_{rt} .

Iniciou-se pelo cálculo do termo L_{bsh} correspondente à atenuação resultante da relação entre H_B e h_b correspondentes à altura do conjunto específico da altura da antena com a altura do prédio subsequente e a altura média dos prédios respetivamente. Neste caso, a antena encontra-se por cima do prédio, portanto, $h_b > H_B$, logo utiliza-se a equação nº 3.40.

$$L_{bsh} = -18 \log(12 - 10 + 1) = -8,59 \text{ dB}$$

Da mesma forma, pela desigualdade acima apresentada, os fatores k_a e k_d são constantes, tendo os valores de 54 e 18 respetivamente.

Para além desses fatores necessitou-se ainda de calcular o fator k_f e para isso utilizou-se a equação nº 3.47.

$$k_f = -4 + 0,7 \left(\frac{2100}{925} - 1 \right) = -3,11 \text{ dB}$$

Calculados todos os termos necessários, realizou-se o cálculo do fator L_{rt} através da equação nº 3.36.

$$L_{rt} = -8,59 + 54 + 18 \log(0,26675) - 3,11 \log(2100) - 9 \log(14) = 14,43 \text{ dB}$$

Calculou-se ainda a atenuação de propagação em espaço livre, representado na equação por L_0 .

$$L_0 = 32,44 + 20 \log(0,26675) + 20 \log(2100) = 27,61 \text{ dB}$$

Tendo os termos L_0 , L_{rt} e L_{rm} calculou-se então a atenuação total, pela equação nº 3.33.

$$L_p = 27,61 + 14,43 + 26,83 = 68,87 \text{ dB}$$

Por fim, determinou-se o valor da potência recebida no terminal móvel através da equação nº 3.1.

$$P_r = 40 - 68,87 + 5 + 2 - 3 = -24,87 \text{ dBm}$$

É de alguma importância salientar que este modelo foi utilizado fora dos seus requisitos de utilização, especificamente no valor da frequência. No capítulo 3.1.6 encontra-se de forma mais completa os requisitos, no entanto, o modelo de *Walfisch-Ikegami* tem como condição de utilização um intervalo de frequências entre 800 e 2000 MHz, o que torna o valor de frequência utilizado fora dos parâmetros.

Apesar de se ter utilizado o modelo fora dos requisitos, o seu resultado não é descartável. Na verdade, apenas considera-se o valor como tendo algum erro extra associado, ainda que seja reduzido visto que a disparidade são apenas 100 MHz.

De seguida, realizou-se ainda a simulação pelo modelo de Okumura-Hata, até porque este foi criado especificamente para ambientes urbanos.

Para a aplicação do modelo, calculou-se da seguinte forma o fator H_{mu} através da equação nº 3.9.

$$H_{mu} = 3,2 \log^2(11,75 * 1,8) - 4,97 = 0,65 \text{ dB}$$

De seguida, calculou-se o fator de correção de cruzamento com a rua, nomeadamente o termo K_{ac} , através da equação nº 3.12.

$$K_{ac} = 2,1 \log(0,26675) - 6,3 = -7,51 \text{ dB}$$

Por se tratar de um ambiente urbano, não há necessidade de adicionar nenhuma correção do meio (*rural, suburban, quasi-open area, open area*).

Reunidos todos os termos necessários ao cálculo das perdas, passou-se então ao cálculo através da equação nº 3.6.

$$L_p = 69,55 + 26,16 \log(2100) - 13,82 \log(12) + [44,9 - 6,55 \log(12)] \log(0,26675) - 0,65 - (-7,51)$$

$$L_p = 126,69 \text{ dB}$$

Finalmente calculou-se a potência recebida no terminal móvel através da equação nº 3.1.

$$P_r = 40 + 5 - 126,69 + 2 - 3 = -82,69 \text{ dBm}$$

Neste caso, deve-se também ter em conta que o modelo foi utilizado fora dos parâmetros. Isto porque a frequência considerada é de 2100 MHz e o modelo está projetado para uma gama de frequências entre 150 MHz e 2000 MHz.

Realizadas as medições bem como as simulações, para efeito de análise crítica, agrupou-se os valores recolhidos na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Apresentação dos valores de potência recebida medida e nas simulações.

	Medição	Modelo Walfisch-Ikegami	Modelo Okumura-Hata	Simulação Matlab
$P_r[\text{dBm}]$	-76,00	-24,87	-82,69	-72,86

De todas as simulações realizadas, a que mais se assemelhou à medição foi a realizada no *matlab* através do modelo de *Longley-Rice*, no entanto, mais uma vez se refere que o ângulo utilizado na simulação não foi o ângulo ideal entre a antena da BS e o terminal móvel, até porque nessa condição o valor era bem mais otimista do que as simulações ou até a própria medição, no entanto, o valor apresentado nesta simulação não deixa de ter valor, até porque o ângulo verdadeiro é uma incógnita e observando a olho nu, a BS em consideração não tem nenhuma antena virada para a localização do terminal móvel aquando da medição. Pelo contrário, o resultado obtido pelo modelo de *Walfisch-Ikegami* foi extremamente otimista e completamente díspar da medição ou dos restantes modelos, muito provavelmente pelo facto de os edifícios presentes no percurso de transmissão não terem dimensões semelhantes.

5.4.2 Indoor

Em ambiente *indoor* o resultado é completamente diferente, realizaram-se medições no centro do edifício e realmente existe um problema de cobertura da rede 4G.

Na Figura 5.29 tem-se a representação de duas medições realizadas na parte central do interior do edifício, aquando da ligação ao eNB 6409.

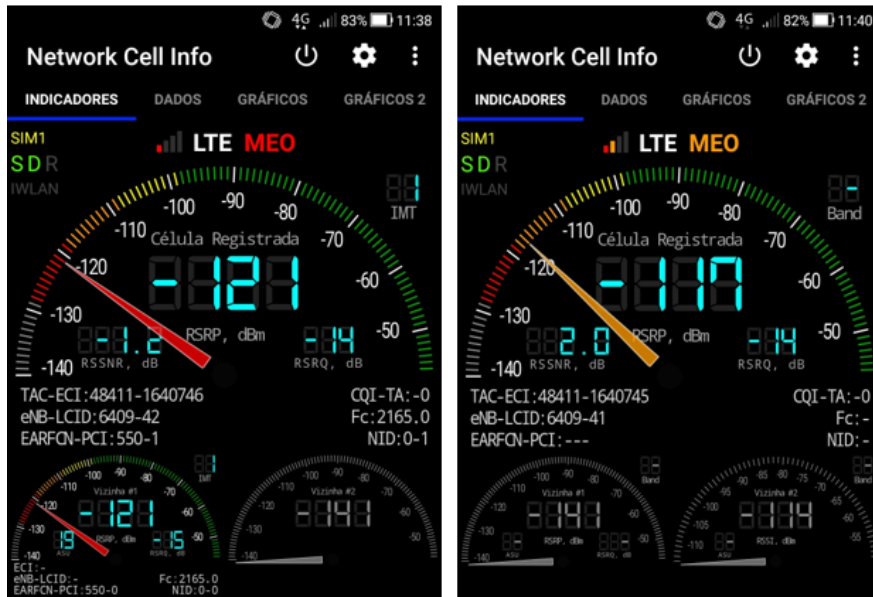


Figura 5.29 - Medições realizadas em ambiente indoor com o terminal móvel conectado ao eNB 6409.

Reparou-se que existem muitas variações do valor recebido no terminal móvel, no entanto, do ponto de vista do utilizador, o tráfego de internet é nulo, é impossível enviar ou receber dados.

Para além da variação do valor, notou-se ainda a elevada ocorrência de troca de tecnologia, entre a rede LTE e a rede UMTS, isto porque quando o valor de potência recebida no terminal móvel no 4G é reduzido ao ponto de ser inferior à sensibilidade deste, ocorre a comutação para a rede 3G.

Tal como em ambiente exterior, nomeadamente no centro da Rua dos Aranhas, verificou-se uma alta ocorrência de handovers para o enB 1822. Na Figura 5.30 representam-se duas medições realizadas em ambiente interior, exatamente no mesmo local que as 2 medições apresentadas na figura anterior.



Figura 5.30 - Medições realizadas em ambiente indoor com o terminal móvel conectado ao eNB 1822.

Mais uma vez, o valor medido é bastante reduzido e torna impossível a transferência de dados na rede. Verificou-se ainda que estando ligado ao enB 1822 consegue-se captar sinal das células

vizinhas. Realizando uma análise mais cuidada à Figura 5.30 verifica-se que numa das células da vizinhança a frequência do sinal captado é da banda dos 800 MHz, o que poderá se traduzir numa boa solução de resolução do problema, como descrito no subcapítulo seguinte.

A elevada ocorrência de *handovers* entre as células poderia levar a se pensar que estaria a ocorrer interferência de sinais, no entanto, os valores de RSRP e RSRQ são reduzidos para todos os casos medidos, o que torna muito baixa a probabilidade da existência de interferência.

Realizou-se ainda uma simulação através do modelo de Lisboa para propagação em interiores e a atenuação introduzida pela presença em ambiente indoor seria semelhante a 11,6 dB com um desvio padrão de 14,7 dB, isto porque neste caso a frequência de operação é a banda dos 2100 MHz.

Calculou-se o valor de potência obtida no interior, através da subtração do valor acima apresentado ao valor de potência medido no centro da Rua dos Aranhas, tendo-se obtido o valor de -90,7 dBm de potência recebida no terminal móvel.

Tabela 5.11 - Apresentação do valor medido e simulado para ambiente interior.

	Medição	Modelo <i>Indoor Propagation</i>
$P_{r[dBm]}$	-121,00	-90,7

O valor de potência obtido na simulação de interiores, insere-se, segundo a ANACOM, na categoria de “Boa Cobertura” o que na verdade passa totalmente ao lado da realidade da medição e do ponto de vista dos utilizadores da rede.

A grande diferença entre os valores de potência à receção no exterior e interior muito provavelmente surge devido ao tipo de material de construção do edifício, juntamente com o facto de este ter várias secções no seu interior, ou seja, várias paredes, que não são menos que obstáculos, provocadores de atenuação por refração através da penetração ou reflexão.

5.4.3 Análise de Soluções

A solução mais lógica seria certamente o aumento da potência de transmissão, no entanto, e principalmente em ambientes urbanos é necessária bastante precaução nesse parâmetro, até pela presença de mais células e com estas vários setores, sendo, portanto, preferível limitar a área com potência radiada com o intuito de evitar vários problemas como a interferência ou até pela exposição à energia eletromagnética.

Realizou-se uma simulação no *matlab* através do modelo de *Longley-Rice* em que se manteve a antena no local do enB 6409 e simplesmente se trocou de banda de frequências passando para os 800 MHz bem como o valor de potência de emissão para 15W em vez dos 10W. Mantendo o ângulo e todos os outros parâmetros, o valor de potência obtido no centro da Rua dos Aranhas foi de -70,99 dBm, o que se traduz numa melhoria comparativamente aos -72,86 dBm anteriormente obtidos na simulação.

Apesar de o valor de potência recebida ter melhorado, é uma solução relativamente incerta, isto porque a diferença de valores não é muito elevada, no entanto, é uma solução muito provavelmente considerada barata e, portanto, candidata a ser testada.

Outra solução consiste na introdução de mais um setor, direcionando este para a zona problemática.

De forma a verificar a melhoria na cobertura, realizou-se uma simulação novamente pelo modelo de *Longley-Rice*, tendo-se obtido o resultado apresentado na Figura 5.31.

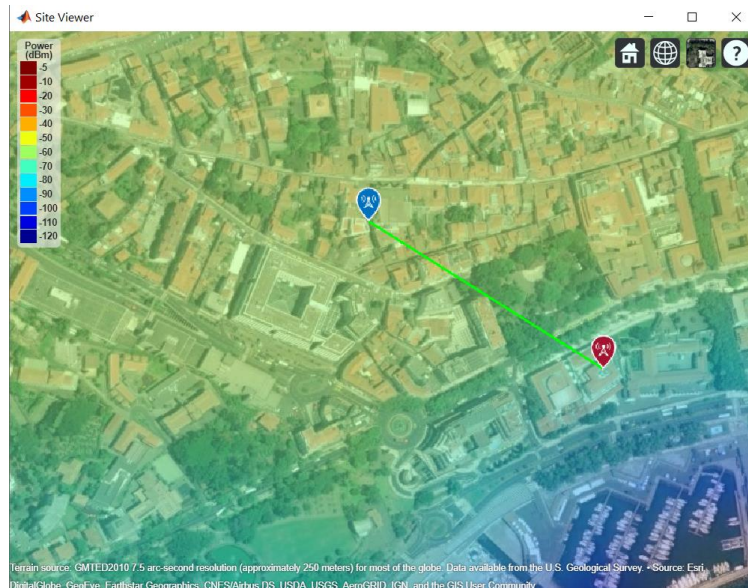


Figura 5.31 - Mapa de cobertura com a adição do setor direcionado para a zona problemática.

Nestas condições obteve-se uma potência de -40,59 dBm na receção, o que é um valor excelente.

Do ponto de vista do utilizador, pode-se dizer que esta é uma solução completamente eficaz, no entanto, esta alteração nos parâmetros é uma solução que a nível de cobertura exterior não se justificaria, pois, o verdadeiro problema reside no interior do edifício, sendo, portanto, uma solução pouco viável do ponto de vista económico. Esta solução poderia ser implementada em qualquer uma das estações base circundantes à zona problemática, visto estarem todas relativamente próximas ao local e nenhuma ter uma antena orientada para o mesmo.

Tendo em conta que se tem um bom valor de potência recebida no centro da Rua dos Aranhas, a solução que mais uma vez parece ser a mais viável seria a colocação de um repetidor, o mesmo sistema descrito nos casos de estudo anteriores em que seria instalada uma antena exterior, para a receção do sinal vindo do enB, passando este pelo amplificador e posteriormente ser radiado através da antena interior chegando desta forma ao terminal móvel para receção dos dados. O envio de dados por parte do utilizador tem exatamente o sentido oposto ao descrito.

O sistema de comunicação através de um micro repetidor, para além de garantir a cobertura interior, é um sistema com um custo de compra relativamente barato, bem como os gastos de alimentação, isto porque este sistema não requer uma grande quantidade de potência na sua alimentação.

5.5 Estudo de Caso – Fonte do Bispo

O planeamento de uma célula é um processo algo complexo visto que engloba dois tipos de planeamento, o de cobertura e o de capacidade. Normalmente os objetivos passam por garantir cobertura, qualidade de serviço, e minimizar ao máximo os custos. Nesta dissertação o foco é dado ao planeamento de cobertura, evidentemente.

No planeamento de cobertura de uma célula, a potência do transmissor, localização, número e tipo de antenas, ganhos e perdas do sistema e os modelos de propagação, são fatores cruciais para garantir a cobertura dos utilizadores móveis.

Como referido anteriormente, no LTE as bandas de frequências utilizadas são os 800 MHz, 1800MHz, 2100 MHz e os 2600 MHz e este fator é crítico visto que a frequência influencia a forma de propagação, nomeadamente a diretividade através de estreitamentos ou alargamentos do elipsoide de Fresnel, o que, por sua vez, influencia a atenuação de propagação, alterando assim a potência que chega aos terminais móveis.

Dependendo da zona, deve ser tido em conta o tipo de móvel usufruirão da célula, isto porque, é diferente receber sinal em velocidade nula ou baixa comparativamente à circulação de automóvel em que por vezes é necessário receber sinais a uma velocidade de 90 km/h, 120 km/h ou até mais, no entanto, o planeamento é em território da ilha da Madeira, e sendo a área de interesse uma zona do planalto Paul da Serra, em que a circulação é obviamente fora de localidades, a velocidade máxima a considerar de forma a manter a qualidade de serviço é 90 km/h, sendo este o pior cenário possível em termos de velocidade e conseqüente efeito doppler.

Em zonas rurais normalmente as antenas são posicionadas em alturas mais elevadas, estando na maioria das vezes em torres com alturas de aproximadamente 45 metros, conseguindo assim cobrir uma área extensa, com o contributo do tipo de antena escolhido, que recai sobre as omnidirecionais. O uso deste tipo de antenas é justificado pelo baixo número de utilizadores em condições normais, sendo, portanto dispensável a criação de sectorização. Na ilha da Madeira, em zonas rurais chegam a haver *sites* com uma torre de 80 metros de altura, como é o caso da torre do pico do Silva, nas zonas altas da Camacha.

A potência de transmissão deverá ser próxima dos valores máximos de transmissão, isto porque, consegue-se garantir uma área de cobertura maior, apesar de mais uma vez ser uma opção que de certa forma limita o número de utilizadores, o que, em condições normais não representa qualquer tipo de problema, na condição de estar livre de interferências com o sinal de estações-base vizinhas.

A rede da MEO tem alguns problemas de cobertura nas zonas altas da Madeira. É normal e expectável que em zonas de floresta intensa não haja presença de campo elétrico, no entanto, a fonte do bispo, sendo uma zona com uma afluência de locais e/ou estrangeiros relativamente alta, até pela presença de uma zona de churrasco e por ser zona de campismo e ainda por ter uma casa da guarda florestal, merece alguma atenção por parte das operadoras.

Na Figura 5.32 ilustra-se algumas características do local de estudo, especificamente a área mais utilizada para piqueniques e campismo.



Figura 5.32 - Fonte do Bispo

Localiza-se na serra do concelho da Calheta, e tem à sua volta a uma distância relativamente grande outras estações, tal como representado na Figura 5.33.

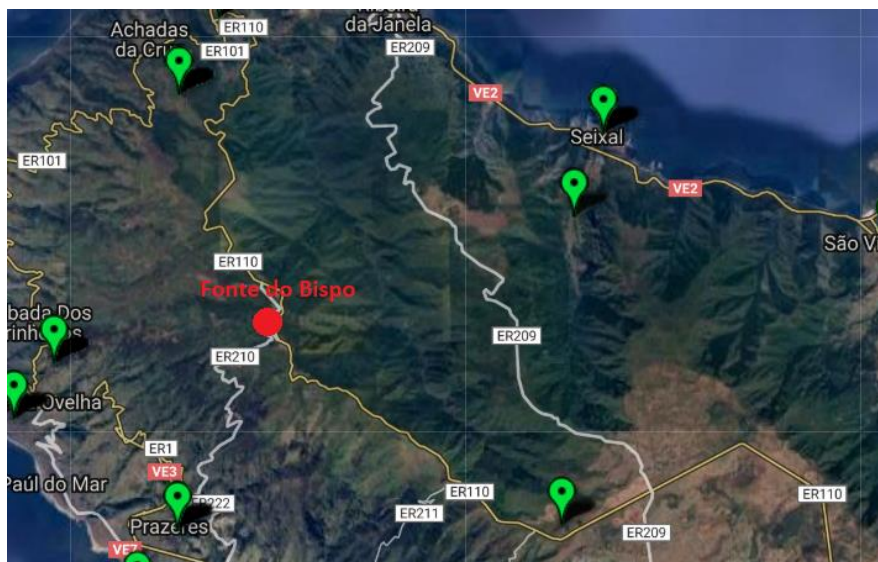


Figura 5.33 - Localização da zona de estudo e das *base stations* adjacentes na rede MEO.

Como se pode ver, a fonte do bispo localiza-se numa zona de certa forma longe das estações sentindo por isso a necessidade da criação de uma célula para cobrir toda aquela zona, isto porque o problema de falta de cobertura não é específico da área de lazer anteriormente descrita. Na verdade, o terminal móvel utilizado para as medições nada conseguiu medir num percurso de quilómetros pela estrada do Paul da Serra, o que comprova a ausência de campo elétrico ou pelo menos um valor inferior à sensibilidade de um telemóvel comum. A ideia da criação da célula é a de conseguir garantir cobertura na fonte do bispo e no troço problemático da estrada regional 110.

A área com deficiência de cobertura encontra-se representada na Figura 5.34.

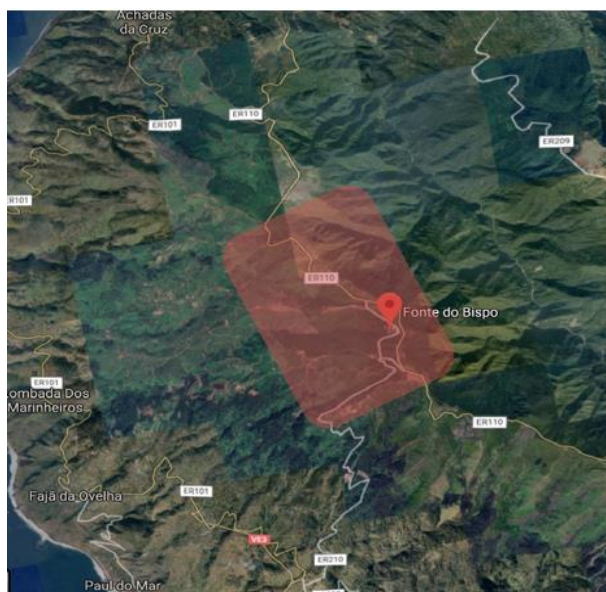


Figura 5.34 - Identificação da zona problemática.

Confirma-se que o problema não é exclusivo da zona de lazer fonte do bispo, mas sim de toda a área identificada a vermelho na figura, sendo por isso uma boa medida a criação de uma célula. A solução não poderia passar pela utilização de uma *femtocell* visto que se trata de uma área demasiado grande, o que torna essa opção inviável.

Para além da cobertura LTE seria necessário ainda garantir a presença de cobertura UMTS ou até mesmo GSM, isto porque, na operadora MEO não é utilizada a tecnologia VoLTE, portanto o 4G torna-se incapaz de transmitir voz. No entanto, para efeitos de estudo, tal como nos casos anteriores focou-se no 4G.

Como visto anteriormente, para LTE os requisitos mínimos de potência (RSRP) para se considerar um funcionamento de serviço aceitável é, segundo a ANACOM -115 dBm. [48]

De forma a ter noção da potência a instalar realizou-se simulações no *matlab*, e ainda o cálculo através do modelo de propagação mais adequado, de forma a comparar os valores e apresentar uma visão crítica do problema de cobertura.

5.5.1 Projeto e Simulação.

Inicialmente verificou-se que soluções poderiam ser tidas em conta utilizando alguma *base stations* nas proximidades de forma a minimizar os custos o quanto possível, no entanto, as *base stations* mais próximas estão na verdade consideravelmente distantes e com especial foco para as zonas habitadas, isto é, direcionadas para o lado do mar.

Para a resolução deste problema, procurou-se uma zona onde se pudesse instalar uma pequena torre, com o mínimo de impacto visual possível mas que pudesse garantir ao máximo a cobertura em toda a zona identificada na Figura 5.34, especialmente na área de lazer da Fonte do Bispo, sem criar qualquer tipo de interferência com as células vizinhas.

Numa primeira fase testou-se a viabilidade desta solução com a 1ª banda de LTE, a banda dos 800 MHz, estando os parâmetros técnicos apresentados na tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Parâmetros técnicos para a simulação nos 800 MHz

Parâmetros Técnicos	
Frequência	800 MHz
Altura da Torre	15 m
Potência de Emissão	15 W
Largura de Banda	20 MHz
Ganho do Terminal Móvel	2 dBi
Figura de Ruído do Terminal Móvel	7 dB
Altura do Terminal Móvel	1,8 m
Potência de Ruído do Terminal Móvel	-93,98 dB

Decidiu-se que a torre ficaria localizada numa zona relativamente próxima à Fonte do Bispo, tal como representado na Figura 5.35.

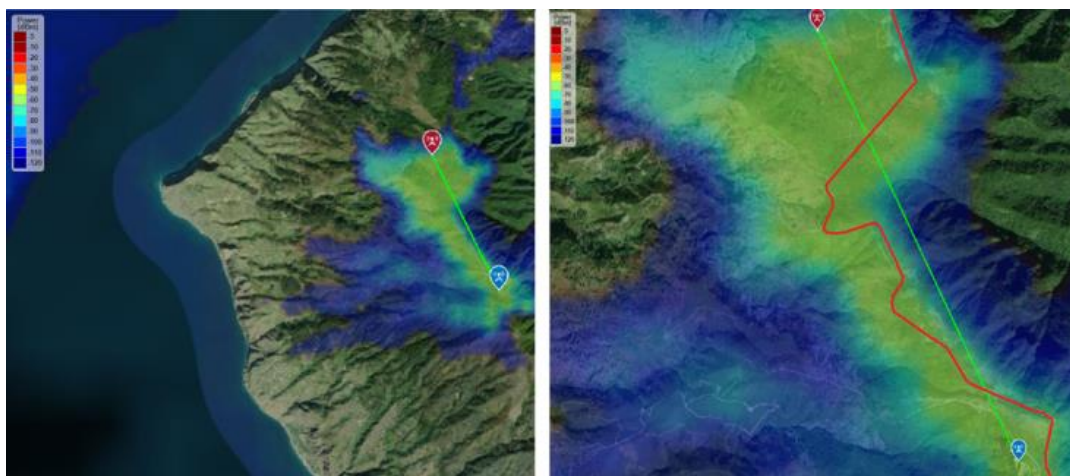


Figura 5.35 - Simulação do mapa de cobertura de potência.

A localização da torre tem como coordenadas de latitude e longitude 32.819406 e -17.197573 respetivamente, sendo esta localização escolhida de forma a utilizar o obstáculo montanhoso a montante da torre como bloqueador de radiação indesejada para outros locais além da zona problemática. Juntamente com a localização, parâmetros como a altura da torre e os ângulos de direção e inclinação da antena merecerem um cuidado especial de forma a conseguir cobrir a área desejada, sendo estes parâmetros fundamentais no projeto e análise do ponto de vista da radiopropagação.

Para além do mapa, através da simulação obteve-se um valor para a potência recebida no terminal móvel, neste caso, para a localização na área de lazer da Fonte do Bispo, a potência recebida seria de -52,14 dBm.

Ao realizar simulações variou-se o valor do *tilt* da antena isoladamente de forma a conseguir maximizar o valor de potência recebido na zona de interesse, tendo sido obtido o valor 12º como ótimo.

Tal como nos casos anteriores descritos, para efeitos de comparação, realizou-se ainda o cálculo através dos modelos de propagação.

O modelo de propagação escolhido para este caso foi o modelo de Okumura-Hata, visto ser o modelo mais adequado para o cenário, recorrendo obviamente aos fatores de correção por não se tratar de um ambiente urbano.

Inicialmente calculou-se o fator de correção para a altura efetiva da antena do móvel, o parâmetro H_{mu} , tendo-se considerado “*large city*” e, portanto, optou-se pela equação nº 3.9.

$$H_{mu} = 3,2 \log^2(11,75 * 1,8) - 4,97 = 0,65 \text{ dB}$$

De seguida calculou-se o fator de correção para este ambiente através da equação nº 3.23. A escolha desta equação é baseada no facto de o Paul da Serra ser um planalto e pela ausência de obstáculos ou vegetação significantes, considerou-se como sendo *open area*.

$$K_{oa}(f)_{[dB]} = 4,78 \log^2(800) - 18,33 \log(800) = 27,97 \text{ dB}$$

Com estes dois parâmetros calculados prosseguiu-se para o cálculo da atenuação de percurso, através da equação nº 3.6 da seguinte forma.

$$L_p = 69,55 + 26,16 \log(800) - 13,82 \log(15) + [44,9 - 6,55 \log(15)] \log(3,54) - 0,65 - 27,97$$

$$L_p = 121,04 \text{ dB}$$

Por fim, calculou-se a potência obtida no recetor pela equação nº 3.1 tendo-se obtido o seguinte valor.

$$P_{r[dBm]} = 41,76 + 5 - 121,04 + 2 - 3 = -75,28 \text{ dBm}$$

De acordo com os parâmetros disponibilizados pela ANACOM, este valor de potência insere-se na categoria de “Boa”.

Neste caso, por ser uma zona rural, e por não haver praticamente nenhuma estação base nas redondezas, considera-se ainda como solução a utilização de uma antena omnidirecional na torre, de forma a cobrir a área circundante sem nenhuma direção específica, até porque para além da zona de lazer da fonte do bispo especificamente, toda aquela área apresentada na Figura 5.34 apresenta ausência de sinal.

Para a simulação nestas condições realizou-se apenas uma alteração, a localização da torre. O que motivou à alteração da posição foi o facto de a radiação ser teoricamente de forma circular a partir da antena, e portanto, só faz sentido que esta seja colocada numa zona o mais ao centro possível da zona problemática. O local escolhido encontra-se representado na Figura 5.36.

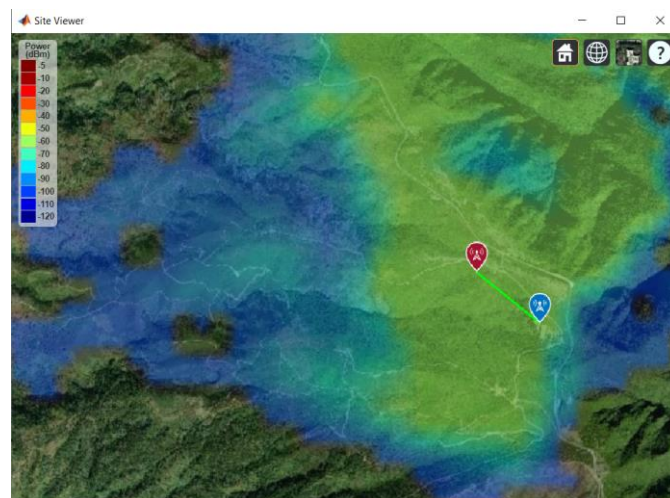


Figura 5.36 - Mapa de cobertura com antena omnidirecional.

Verifica-se que tal como nas anteriores soluções, tanto a zona de lazer da fonte do bispo como a estrada regional encontram-se completamente cobertas, no entanto, com esta solução há um grande desperdício de potência para zonas em que não se justifica, até por não terem acesso humano possível em condições normais.

Segundo a simulação realizada, o valor de potência recebida na Fonte do Bispo foi -60,73 dBm e na estrada regional temos valores semelhantes em boa parte da área problemática, no entanto, nas zonas da estrada mais à periferia temos valores próximos a -120 dBm, podendo essas zonas, em contexto real, apresentar ausência de campo elétrico, colocando quem transita fora de cobertura.

Neste caso, apesar de a radiação ser emitida uniformemente em todas as direções, dificilmente causaria interferência pelo facto de não haver *base stations* por perto, no entanto, este tipo de antenas raramente utilizado em comunicações móveis porque é causador de interferências nas zonas de *handover*.

Os valores alcançados pelas três simulações foram os apresentados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Apresentação dos valores de potência recebida em todas as simulações.

	Simulação Matlab	Modelo de Propagação	Simulação Matlab (omnidirecional)
$P_r[dBm]$	-52,14	-75,28	-60,73

Verifica-se uma considerável disparidade entre os valores, fruto das diferentes formas de previsão do valor, isto é, dos diferentes modelos de propagação utilizados. Como referido anteriormente o programa utilizado no *software Matlab* baseia-se no modelo *Longley-Rice* enquanto que o modelo de propagação escolhido para este estudo foi o modelo de *Okumura-Hata*.

É de importância reforçar o facto de que nenhum modelo é perfeito e que, portanto, a tarefa de escolher os parâmetros técnicos é extremamente complexa.

Para este caso específico, em todas as simulações o valor da potência à receção apresenta-se muito acima dos valores mais problemáticos, especificamente abaixo de -115 dBm, caso contrário seria difícil escolher um dos modelos como base de projeto, tendo sempre em conta a minimização dos custos.

No caso de estarmos perante um cenário como o anteriormente descrito, a posição muitas vezes assumida pelos engenheiros é a de seguir a opção mais pessimista, de forma a garantir a funcionalidade no período anual estimado e/ou desejado.

6 Conclusão

Este trabalho teve como principal objetivo um estudo da rede de cobertura da quarta geração na ilha da Madeira, com a apresentação de soluções sugestivas como forma de melhoria para as zonas problemáticas, isto é, as zonas com cobertura fraca ou inexistente.

Identificaram-se algumas zonas problemáticas, passou-se à medição de potência recebida, simulações e por fim realizou-se uma análise de todas as possíveis soluções, tendo sempre como requisito principal o menor custo possível por parte da operadora na resolução do problema de forma a alcançar a satisfação dos clientes.

Um dos grandes problemas da ilha da Madeira é a sua orografia difícil. Por ser uma ilha com um terreno montanhoso, criam-se muitas zonas de sombra, o que complica bastante a tarefa das operadoras de garantir a cobertura a toda a população.

Apesar dos modelos de propagação serem bastante úteis no planeamento das células, este processo caracteriza-se pela sua elevada complexidade devido à elevada sensibilidade requisitada no planeamento. Não basta verificar se o resultado da simulação pelos modelos de propagação é positivo, até porque os modelos foram criados num cenário específico, obrigando a que em outros locais se façam algumas correções. Nunca existirá um único modelo ou uma equação que seja infalível para todos os ambientes, até porque estes estão em constante alteração, seja pela construção de prédios, seja pelo próprio movimento dos automóveis nas zonas urbanas e suburbanas ou até mesmo pelo crescimento da vegetação nas zonas rurais.

A escolha da frequência utilizada em cada cenário é de extrema importância. Foi visto que frequências mais reduzidas têm maior facilidade em contornar obstáculos, através da difração. As frequências mais elevadas quase que requerem linha de vista entre os transmissores, garantido por outro lado uma maior disponibilidade de largura de banda.

Do ponto de vista dos utilizadores, a seleção de um operador não deve passar apenas pela escolha do que apresenta tarifários com custo mais reduzido. Uma simples verificação do nível de sinal e comparação com as outras operadoras é muito provavelmente o parâmetro mais importante, não só pelo facto de a maioria dos tarifários ter um período de fidelização de dois anos, como pelo facto de a zona onde o utilizador habita e trabalha são em princípio os locais onde passam a maior parte do seu tempo.

Para além das zonas problemáticas identificadas, existem muitas deficiências de cobertura em ambientes *indoor*, dificultando o adequado funcionamento de empresas ou afetando a comodidade dos utilizadores pessoais, obrigando-os a se deslocar para junto das vidraças ou mesmo para o exterior da sua habitação para estabelecer comunicações pelo que a solução mais viável encontrada é a colocação de micro repetidores.

A ilha da Madeira carece de alguma atenção nas zonas mais rurais por parte da operadora MEO, isto por ser uma região fortemente ligada ao turismo, com inúmeros locais paisagísticos e convidativos para convívios e/ou acampamentos. A zona da Fonte do Bispo foi uma zona de estudo que demonstrou isso, sendo muito visitada por turistas bem como por regionais/nacionais, mas incapacitada do fornecimento de dados móveis aos mesmos.

A realização da parte prática deste trabalho foi de certa forma difícil pela falta de acesso à informação real da rede instalada na Madeira, mais especificamente, ao não fornecimento de qualquer tipo de informação sobre os parâmetros técnicos das *base stations* da região, tais como o número de setores, o ângulo das antenas, potência de emissão e altura das torres. De início conseguiu-se consultar uma página de website com a localização de todas as *base stations*, sendo a mesma descontinuada em inícios de Dezembro de 2019.

6.1 Trabalhos Futuros

Como sugestão de trabalhos futuros propõe-se a realização de mais testes de cobertura em zonas problemáticas. Particularmente na rede da MEO, esta apresentou ter algumas fragilidades nas zonas mais rurais, pelo que poderá ser dada uma maior consideração a estas zonas, através da perceção das causas e posterior correção.

Propõe-se ainda a melhoria das redes nos túneis, não só a rede 4G como todas as outras, até porque em muitos túneis da região ocorrem quedas de chamadas, não sendo de forma nenhuma cómoda a passagem nestes com uma ligação estabelecida. Deve ser considerada a utilização de mais repetidores de sinal ao longo do túnel ou aumento da potência de emissão, tendo o cuidado de evitar interferências indesejadas.

A cobertura em interiores deve também ser melhorada, deve ser encontrada uma solução relativamente barata e eficaz principalmente para as redes que suportam chamadas telefónicas e mensagens de texto, até porque as pessoas passam a maior parte do seu tempo em casa e tencionam, na maioria do tempo, poder contactar e estar contactáveis.

A otimização dos sistemas de energia de forma a melhorar a autonomia nos aparelhos utilizados nas redes de comunicações móveis, isto é, um aumento da capacidade das baterias bem como economizar as aplicações.

O levantamento e estudo da rede privada de emergência na ilha da Madeira, o seu estado atual, a sua aptidão ou carência de capacidade de resposta em locais de maior risco como por exemplo nas levadas ou noutras zonas paisagísticas mais imersas nos rochedos e vales, com maior dificuldade de receção de sinal, mas muito frequentadas por turistas essencialmente.

Por fim, como não poderia deixar de ser sugerido, o planeamento das células da rede 5G que certamente será um processo complexo, pelo facto de as frequências utilizadas serem muito mais elevadas, tornando a radiação mais diretiva. Além disso, o número de estações base certamente aumentará de forma a garantir a largura de banda necessária para o tão desejado aumento dos ritmos de transmissão. O planeamento passa ainda pelo design dos terminais móveis, a pesquisa através da realização de testes em variadas condições, do comportamento das antenas com a tecnologia MIMO.

7 Bibliografia

- [1] C. Salema, "Telecomunicações o sistema nervoso da sociedade moderna," Instituto de Telecomunicações, Lisboa, 2015.
- [2] M. Castro, "Comunicações Celulares - Sistemas Wireless e Padrões," PUCRS, Rio de Janeiro, 2009.
- [3] N. Kularatna e D. Dias, Essentials of Modern Telecommunications Systems, Boston, London: Artech House, 2004.
- [4] A. Moura, "Redes de Comunicações Móveis," FEUP, Porto.
- [5] T. Farley, "Mobile telephone history," Telektronikk, 2005.
- [6] M. J. Leitão, "Redes de Comunicação Móvel," FEUP, Porto.
- [7] F. Singo, Comunicações Móveis e sem Fios, Universidade Virtual Africana, 2017.
- [8] Sesa, Toufik e Baker, LTE, The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice, Wiley, 2011.
- [9] L. Correia, Mobile Communications Systems, Lisboa: IST, 2018.
- [10] C. A. C. Fernandes, Aspectos de Propagação em Serviços de Rádio Móvel (parte 1), IST Lisboa: Secção de Propagação e Radiação DEEC-IST, 1993.
- [11] D. Etter, "KidsAhead - SMU CSI Camps: Phones and GPS Location," Fevereiro 2011. [Online].
- [12] L. M. D. J. S. Correia, "Cellular Networks," IST, Universidade de Lisboa, 2017.
- [13] J. Figanier, Aspectos de Propagação na Atmosfera, C. A. Fernandes, Ed., IST Lisboa: IST.
- [14] M. Sauter, From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G, Wiley, 2017.
- [15] L. M. Correia, "Radio Channel Characterisation," IST, Lisboa, 2018.
- [16] L. M. Correia, "Radio Interface," IST, Lisboa, 2018.
- [17] B. Jovic, Synchronization Techniques for Caotic Communication Systems, Springer, 2011.
- [18] P. Queluz e F. Pereira, "Introdução às Comunicações Móveis," IST, 2006.
- [19] ANACOM, "Frequências - Autoridade Nacional de Comunicações," Lisboa, 2015.
- [20] I. Poole, "LTE OFDM, OFDMA SC-FDMA & Modulation," ElectronicNotes.
- [21] R. E. M. Neto, "Sistemas Rádio-Fibra usando SC-FDMA E OFDM," FEUP, INESCPORTO, 2014.
- [22] L. M. Correia, "Propagation Models," IST, Lisboa, 2018.
- [23] L. E. G. "MIMO TECHNIQUES - CAPACITY & COVERAGE ENHANCEMENT IN 4G LTE," Fevereiro 2017. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=hII4ZQb-A70>.
- [24] A. Ghosh, J. Zhang, J. Andrews e R. Muhamed, Fundamentals of LTE, Prentice Hall, 2010.
- [25] F. Fernandes, C. Rom, M. P. Queluz, A. Rodrigues e S. Svendsen, "Simulação de canal MIMO para 5G em ondas milimétricas," Instituto de Telecomunicações, Lisboa, 2018.
- [26] L. M. Correia, "Mobility and Traffic," IST, Lisboa, 2018.

- [27] M. C. Baptista e N. B. Carvalho, "Classificação Automática da Modulação de Sinais Digitais em R.F.," ICP-ANACOM, IT-Universidade de Aveiro, 2008.
- [28] M. Addulmahdi, "GSM Architecture with GMSK," Al-Furat Al-Awsat Technical University, 2013/2014.
- [29] S. Vairagade e P. Pahadiya, "Performance Analysis of BPSK, QPSK & QAM System using Turbo Coding," 2015.
- [30] L. M. Correia, "Cellular Design," IST, Lisboa, 2018.
- [31] C. Amaral, "Uma Análise do Modelo de Propagação Longley-Rice sob a perspectiva de Ambientes Urbanos Localizados em Área de Clima Tropical," Universidade Federal de Minas Gerais, , 2012.
- [32] J.. Magalhães, "Verificação de Modelos de Propagação em Ambiente Urbano," IST Lisboa, 2012.
- [33] L. M. Correia, "5G: o futuro (próximo) nas comunicações móveis," Junho 2019.
- [34] Design1st, "How will 5G impact IoT product development?," Ontario, Canadá, 2018.
- [35] J. Morgan, "A Simple Explanation Of The Internet of Things," Forbes, 2014.
- [36] X. Qiao, P. Ren, G. Nan, L. Liu, S. Dustdar e J. Chen, "Mobile Web Augmented Reality in 5G and Beyond: Challenges, Opportunities, and Future Directions," Setembro 2019.
- [37] A. Bradford, "What is Augmented Reality?," LiveScience, 2018.
- [38] G. Hughes, O. Tur, A. Agag, T. Nandagopal, R. A.-S. L. Laursen e L. J. Young, "Telecom Experts Plot a Path to 5G," Outubro 2015.
- [39] Imai, Kitao, Tran, Omaki, Okumura, Sasaki e Yamada, "Development of High Frequency Band over 6 GHz for 5G Mobile Communication Systems," 2015.
- [40] G. Yang e C. Taylor, "4x4 MIMO Boosts 4G and Gives Consumers a Taste of the Gigabit Experience," STRATEGY ANALYTICS, 2017.
- [41] KeySight, "Seven Things You need To Know About 5G New Radio," 2018.
- [42] Y. Huo, W. Xu e M. Yuen, "Cellular and WiFi Co-design for 5G User Equipment," Julho 2018.
- [43] F. Gastiazoro, "What is Remote MAC-PHY?," Intraway, 2018.
- [44] Kulkarni, Kaya, Calin e Andrews, "Impact of humans on the design and performance of millimeter wave cellular networks in stadiums," em *Wireless Communications and Networking Conference*, 2017.
- [45] A. Tobin, "5G Will Account For 15% Of Global Mobile Market By 2025," Forbes, 2019.
- [46] ANACOM, "Neutralidade tecnológica nas faixas dos 900 MHz e 1800 MHz," 2016.
- [47] J. Spivak, "Raising the (Phone Coverage) Bars in Commercial Buildings," 2014. [Online]. Available: <https://urbanland.uli.org/industry-sectors/infrastructure-transit/raising-phone-coverage-bars-commercial-buildings/>. [Acedido em Outubro 2019].
- [48] Autoridade Nacional das Comunicações, "Sistemas de Comunicações Móveis GSM/UMTS/LTE - ANACOM," ANACOM, 2014.
- [49] J. A. Desai e S. N. Kulkarni, "Effect of Noise on BER of BPSK, QPSK, DPSK, and QAM Modulation Techniques," 2016.
- [50] "LTE Reference Sensitivity Calculation, How it depends on SNR, why throughput decrease at the Cell edge?," Techplayon Explore, Learn and Share, 2018.