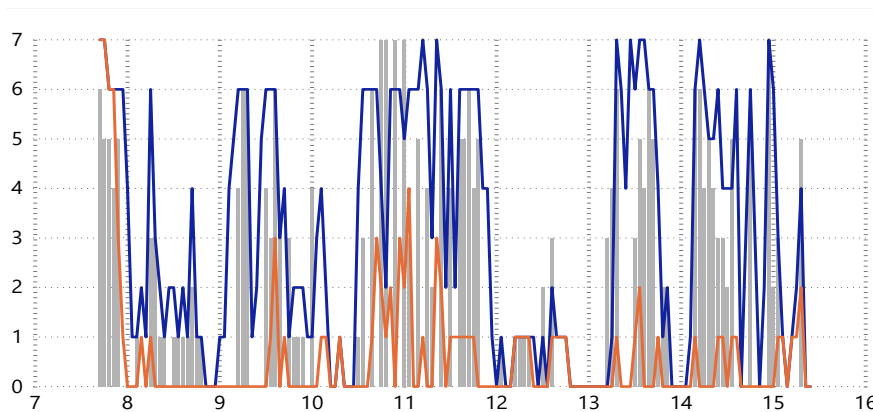




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações e de Computadores



QoS em Comunicações Ferroviárias - Impacto da Interferência de Redes Públicas

André Miguel Antunes Rouco

(Licenciado)

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações

Orientador : Professor Nuno António Fraga Juliano Cota

Júri:

Presidente: Doutor Nuno Miguel Machado Cruz

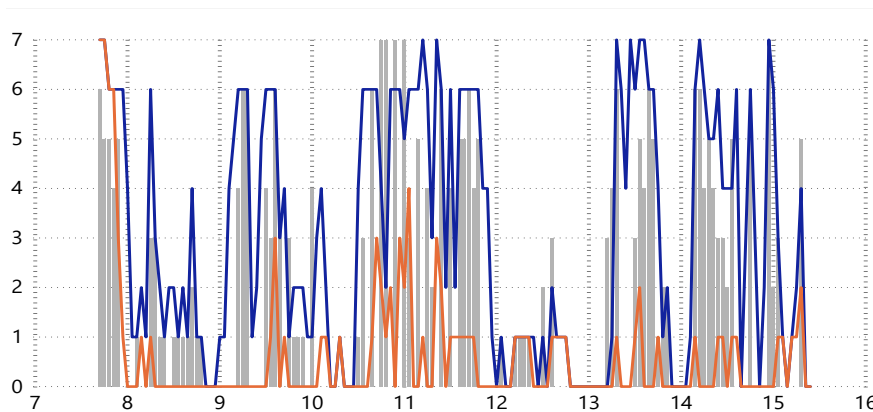
Vogal: Doutor António João Nunes Serrador

fevereiro, 2021



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações e de Computadores



QoS em Comunicações Ferroviárias - Impacto da Interferência de Redes Públicas

André Miguel Antunes Rouco

(Licenciado)

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações

Orientador : Professor Nuno António Fraga Juliano Cota

Júri:

Presidente: Doutor Nuno Miguel Machado Cruz

Vogal: Doutor António João Nunes Serrador

fevereiro, 2021

*Aos meus pais, avô, familiares e a todos os meus amigos
pelo apoio incondicional em todos os momentos difíceis da
minha trajetória acadêmica. Este trabalho é dedicado a eles.*

Agradecimentos

Antes de mais, quero agradecer ao Professor Nuno Cota e à Engenheira Ana Rita Beire que me auxiliaram durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho, partilhando sempre novas ideias e metodologias para obter os melhores resultados possíveis.

À Solvit, por ter fornecido todas as ferramentas necessárias para este estudo e por todo o conhecimento que me fez adquirir ao longo dos últimos anos fazendo-me crescer como pessoa e engenheiro.

À Infraestruturas de Portugal (IP), por ter fornecido os recursos e toda a informação necessária para a realização deste trabalho.

Agradeço também aos meus colegas da Solvit: Bruno Talhão, Pedro Lopes e India Rodeia que foram uma fonte inesgotável de apoio durante todo o processo.

Aos meus amigos do ISEL, Tiago Domingos, Pedro Prior, Paulo Capitão, David Cheis e Gonçalo Costa pelos extensos dias dedicados aos trabalhos e pela bela amizade que foi desenvolvida ao longo dos anos.

Também quero agradecer aos meus primos Joana Paiva, Teresa Bento, Emilie Brás, Sara Rodrigues, Rodrigo Belo e a todos os meus familiares e amigos por todo o apoio prestado, não só no decorrer desta dissertação, mas ao longo da vida, pois sem eles não chegaria aqui.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer aos meus pais, avó e à minha tia Salomé por me terem orientado ao longo de toda a minha vida tornando-me no que sou hoje e ao meu avô pela oportunidade que me deu de lutar pelos meus sonhos.

Resumo

Nos dias de hoje e no futuro, vai ser cada vez mais importante a necessidade de existir uma coexistência entre diferentes redes móveis a operarem nas mesmas bandas, face a reutilização do espetro. Posto isto, algumas operadoras *Global System for Mobile Communications-Railways* (GSM-R) notaram limitações operacionais causadas por interferências provenientes de outras redes móveis o que tende a aumentar cada vez mais, devido ao crescimento esperado das redes GSM-R e ao potencial crescimento de redes móveis públicas.

Assim sendo, um dos passos fundamentais no planeamento de uma rede rádio de comunicações móveis é a escolha das frequências utilizadas dada a necessidade de coexistência, não só com outros operadores mas com a própria rede. Em comunicações móveis ferroviárias esta escolha requer uma maior exatidão do que nas redes públicas, tendo em conta os requisitos de segurança que as abrangem. Assim, é necessário utilizar algoritmos que estimem a interferência proveniente, não só das redes ferroviárias, mas também dos operadores públicos, de modo a obter um melhor planeamento/otimização das redes GSM-R.

Posto isto, o objetivo deste trabalho consiste em demonstrar o impacto que as redes implementadas pelos operadores públicos têm face às redes dos operadores ferroviários.

Deste modo, foram realizados algoritmos/*software*, de modo a testar redes reais, para comprovar este impacto. Estes algoritmos foram desenvolvidos de modo a ser integrado com uma ferramenta já existente para o planeamento rádio em ferrovia denominada por SIGRail. O algoritmo foi validado com a comparação com medidas reais recolhidas no cenário de estudo.

Os resultados permitiram concluir que, para o cenário em estudo, o impacto que as redes dos operadores públicos têm face ao GSM-R é bastante acentuado, podendo mesmo, em certas zonas, tornar impraticável o estabelecimento de comunicações entre terminais móveis GSM-R.

Palavras-chave: Qualidade de Serviço; Interferência; Comunicações Ferroviárias; Planeamento de Frequências; Otimização.

Abstract

Today and in the future, the need for different mobile networks operating in the same bands to coexist in the face of spectrum reuse will become increasingly important. That said, some GSM-R operators have noticed operational limitations caused by interference from other mobile networks, which is tending to increase more and more due to the expected growth of GSM-R networks and the potential expansion of public mobile networks.

Therefore, one of the key steps in planning a mobile radio network is the choice of frequencies used given the need for coexistence not only with other operators but with the network itself. In mobile railway communications this choice requires greater accuracy than in public networks, taking into account the safety requirements covering them. It is therefore necessary to use algorithms that estimate interference not only from railway networks but also from public operators in order to achieve better planning/optimisation of gsmr networks.

That said, the objective of this work is to demonstrate the impact that the networks implemented by public operators have on the networks of railway operators.

Subsequently, algorithms/software were performed in order to test real networks to prove this impact. These algorithms were developed to be integrated with an existing tool for railway radio planning called SIGRail. The algorithm was validated by comparison with real measurements collected in the study scenario.

The results show that, for the scenario under study, the impact of the public operators networks on GSM-R is quite strong and may even, in certain areas, make it impractical to establish communications between gsmr mobile terminals.

Keywords: Interference; Quality of Service; Railway Communications; Frequency Planning; Optimization.

Índice

| | |
|--|--------------|
| Lista de Figuras | xvii |
| Lista de Tabelas | xxi |
| Lista de Acrónimos | xxiii |
| Lista de Símbolos | xxvii |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Enquadramento | 1 |
| 1.2 Motivação | 3 |
| 1.3 Estado da Arte | 4 |
| 1.4 Objetivos | 5 |
| 1.5 Organização do documento | 6 |
| 1.6 Contribuições originais deste trabalho | 6 |
| 2 Tecnologias de Acesso Rádio | 7 |
| 2.1 <i>Global System for Mobile Communications</i> | 7 |
| 2.2 <i>Global System for Mobile Communications - Railway</i> | 9 |
| 2.3 <i>Universal Mobile Telecommunications System</i> | 12 |
| 2.4 <i>Long Term Evolution</i> | 14 |
| 2.5 <i>5G - New Radio</i> | 18 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3 | Impacto da Interferência em GSM-R | 23 |
| 3.1 | Causas de Interferência | 23 |
| 3.2 | Emissão Fora-de-Banda | 25 |
| 3.2.1 | GSM / GSM-R | 26 |
| 3.2.2 | UMTS | 29 |
| 3.2.3 | LTE | 32 |
| 3.2.4 | 5G - NR | 35 |
| 3.2.5 | Análise global | 38 |
| 3.3 | Seletividade | 39 |
| 3.4 | Rejeição de Interferência | 42 |
| 3.4.1 | GSM / GSM-R | 43 |
| 3.4.2 | UMTS | 44 |
| 3.4.3 | LTE | 45 |
| 3.4.4 | 5G - NR | 47 |
| 3.4.5 | Análise Global | 48 |
| 3.5 | Dessensibilização da estação base e do terminal | 49 |
| 3.5.1 | UMTS | 51 |
| 3.5.2 | LTE | 52 |
| 3.5.3 | 5G - NR | 53 |
| 3.5.4 | Análise Global | 54 |
| 3.5.5 | Distância de Isolamento | 55 |
| 3.6 | Bloqueio do terminal e estação base | 57 |
| 4 | Caso de Estudo | 59 |
| 4.1 | Cenário de Estudo - Linha de Cascais | 59 |
| 4.1.1 | Caracterização da rede de Cascais | 60 |
| 4.1.2 | Equipamento e metodologia de recolha de medidas rádio | 61 |
| 4.1.3 | Medidas rádio | 62 |
| 4.2 | Desenvolvimento da aplicação | 64 |

| | |
|---|-----------|
| <i>ÍNDICE</i> | xv |
| 4.2.1 Ferramenta <i>SIGRail Planning</i> | 64 |
| 4.2.2 Interferência na própria rede | 68 |
| 4.2.3 Interferência proveniente de redes públicas | 71 |
| 4.3 Análise de Resultados | 71 |
| 4.3.1 Validação do modelo desenvolvido | 72 |
| 4.3.2 Medidas de mitigação | 78 |
| 5 Conclusões | 85 |
| 5.1 Trabalho Desenvolvido | 85 |
| 5.2 Resultados | 86 |
| 5.3 Trabalho Futuro | 87 |
| Referências | 89 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Implementação das redes GSM-R no Mundo por ano [2]. | 3 |
| 2.1 | Esquema do canal físico do GSM | 8 |
| 2.2 | Representação dos domínios de frequência das tecnologias de acesso do LTE em <i>downlink</i> e <i>uplink</i> . Extraído de [15]. | 14 |
| 2.3 | <i>Resource Block</i> . Extraído de [16]. | 15 |
| 2.4 | Principais objetivos do 5G. Extraído de [18]. | 19 |
| 2.5 | Opções de utilização de todo o espectro do 5G. Extraído de [18] . . | 20 |
| 2.6 | Opções de utilização de todo o espectro do 5G na Europa. Extraído de [18]. | 21 |
| 3.1 | Gama de frequências utilizadas no intervalo 873-960 MHz. | 23 |
| 3.2 | Causas de interferência analisadas. | 25 |
| 3.3 | Domínio das emissões espúrias. | 26 |
| 3.4 | Representação das curvas de P_{out} | 27 |
| 3.5 | ACLR da Estação Base GSM-R sobre o GSM-R. | 28 |
| 3.6 | Níveis de emissão fora-de-banda de uma estação base GSM-R, na banda do GSM-R (200 kHz). | 28 |
| 3.7 | Caracterização dos parâmetros para cálculo do ACLR em UMTS. . | 29 |
| 3.8 | ACLR da Estação Base e do terminal móvel UMTS 900 sobre o GSM-R. | 30 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.9 | Níveis de emissão fora-de-banda da estação base e do terminal móvel UMTS 900, na banda do GSM-R (200 kHz). | 31 |
| 3.10 | Caracterização dos parâmetros para cálculo do ACLR em LTE. | 32 |
| 3.11 | ACLR da Estação Base LTE 900 sobre o GSM-R. | 33 |
| 3.12 | ACLR do terminal móvel LTE 900 sobre o GSM-R. | 33 |
| 3.13 | Níveis de emissão fora-de-banda de uma estação base LTE 900 na banda do GSM-R (200 kHz). | 34 |
| 3.14 | Níveis de emissão fora-de-banda de um terminal móvel LTE 900 na banda do GSM-R (200 kHz). | 35 |
| 3.15 | ACLR da Estação Base 5G sobre o GSM-R. | 36 |
| 3.16 | ACLR do Terminal Móvel 5G sobre o GSM-R. | 36 |
| 3.17 | Níveis de emissão fora-de-banda de uma estação base 5G na banda do GSM-R (200 kHz). | 37 |
| 3.18 | Níveis de emissão fora-de-banda de um terminal móvel 5G na banda do GSM-R (200 kHz). | 38 |
| 3.19 | Comparação entre as emissão fora-de-banda de uma estação base UMTS, LTE e 5G 900, sobre uma banda de 200 kHz. | 39 |
| 3.20 | Exemplo de ACS. | 40 |
| 3.21 | ACS da estação base e do terminal móvel em GSM-R. | 42 |
| 3.22 | ACS do terminal e estação base GSM-R e OBE da estação base UMTS, LTE e 5G 900. | 43 |
| 3.23 | ACIR GSM-R relativamente à interferência proveniente do GSM-R. | 44 |
| 3.24 | ACIR GSM-R relativamente à interferência proveniente do UMTS 900. | 45 |
| 3.25 | ACIR do terminal móvel GSM-R relativamente à interferência proveniente do LTE 900. | 46 |
| 3.26 | ACIR da estação base GSM-R relativamente à interferência proveniente do LTE 900. | 46 |
| 3.27 | ACIR do terminal móvel GSM-R relativamente à interferência proveniente do 5G 900. | 47 |
| 3.28 | ACIR da estação base GSM-R relativamente à interferência proveniente do 5G 900. | 47 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.29 | Comparação do parâmetro ACIR da estação base GSM-R relativamente à interferência proveniente das redes UMTS,LTE e 5G 900. | 48 |
| 3.30 | Níveis de OBE radiadas pela estação base e terminal móvel UMTS, LTE e 5G 900 em função da separação entre portadoras. | 50 |
| 3.31 | MCL entre o terminal móvel GSM-R e a estação base UMTS 900 (<i>Downlink</i>). | 51 |
| 3.32 | MCL entre a estação base GSM-R e o terminal móvel UMTS 900 (<i>Uplink</i>). | 51 |
| 3.33 | MCL entre o terminal móvel GSM-R e a estação base LTE 900 (<i>Downlink</i>). | 52 |
| 3.34 | MCL entre a estação base GSM-R e o terminal móvel LTE 900 (<i>Uplink</i>). | 52 |
| 3.35 | MCL entre o terminal móvel GSM-R e a estação base 5G 900 (<i>Downlink</i>). | 53 |
| 3.36 | MCL entre a estação base GSM-R e o terminal móvel 5G 900 (<i>Uplink</i>). | 53 |
| 3.37 | Comparação dos valores de MCL entre a estação base GSM-R e as estações base e terminais móveis das redes UMTS, LTE e 5G 900. | 54 |
| 3.38 | Comparação das distâncias mínimas de isolamento, tendo em conta o modelo de propagação definido em [24]. | 56 |
| 4.1 | Linha de Cascais. | 60 |
| 4.2 | Sonda utilizada para recolha de medidas na Linha de Cascais. | 61 |
| 4.3 | Metodologia utilizada para recolha de medidas na Linha de Cascais. | 61 |
| 4.4 | Movimento do comboio ao longo da Linha de Cascais. | 62 |
| 4.5 | Cobertura GSM-R e UMTS na Linha de Cascais. | 63 |
| 4.6 | Portadoras TCH do GSM-R na Linha de Cascais. | 63 |
| 4.7 | RxQual ao longo da Linha Cascais. | 64 |
| 4.8 | Ferramenta SIGRail - Página principal. | 65 |
| 4.9 | Ferramenta SIGRail - Página para criação de uma <i>Network</i> | 66 |
| 4.10 | Ferramenta SIGRail - Página para criação de uma célula. | 67 |
| 4.11 | Ferramenta SIGRail - Página para criação de uma simulação. | 68 |
| 4.12 | C/I com UMTS vs sem UMTS. | 71 |

| | |
|---|----|
| 4.13 RxQual para o site de Alcântara. | 72 |
| 4.14 RxQual para o site de Pedrouços. | 73 |
| 4.15 RxQual para o site de Paço d'Arcos. | 74 |
| 4.16 RxQual para o site de PK16+865 A. | 74 |
| 4.17 RxQual para o site de PK16+865 B. | 75 |
| 4.18 RxQual para o site de São João (Portadora = 959). | 75 |
| 4.19 Histograma de RxQual por site. | 76 |
| 4.20 Histograma de RxQual por portadora. | 77 |
| 4.21 Comparação de RxQual para o site de Alcântara com alteração de frequências. | 79 |
| 4.22 Comparação de RxQual para o site de Pedrouços com alteração de frequências. | 80 |
| 4.23 Comparação de RxQual para o site de Paço de Arcos com alteração de frequências. | 81 |
| 4.24 Comparação de RxQual para o site de PK16+865 A com alteração de frequências. | 82 |
| 4.25 Comparação de RxQual para o site de PK16+865 B com alteração de frequências. | 83 |
| 4.26 Comparação de RxQual para o site de São João com alteração de frequências (Portadora = 959 -> 966 (Nova Frequência). | 83 |

Lista de Tabelas

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Principais parâmetros da tecnologia GSM [3]. | 9 |
| 2.2 | Principais parâmetros da tecnologia GSM-R [3]. | 10 |
| 2.3 | Valores da máscara espectral da BTS GSM-R, para $P \geq 43$ dBm [8]. | 10 |
| 2.4 | Características de bloqueio do GSM-R [9]. | 11 |
| 2.5 | Níveis Mínimos de proteção C/I (voz) [9]. | 11 |
| 2.6 | Parâmetros principais da tecnologia UMTS 900 [3]. | 13 |
| 2.7 | Valores da máscara espectral da estação base UMTS 900, para $P \geq 43$ dBm [12]. | 13 |
| 2.8 | Valores da máscara espectral do terminal móvel UMTS 900 [13]. | 13 |
| 2.9 | Principais parâmetros da tecnologia LTE [3]. | 16 |
| 2.10 | Valores da máscara espectral da estação base LTE 900, para categoria B nas bandas 3 e 8 (Largura de banda = 5, 10, 15 e 20 MHz) [6]. | 17 |
| 2.11 | Valores da máscara espectral da estação base LTE 900, para categoria B nas bandas 3 e 8 (Largura de banda = 1.4 e 3 MHz) [6]. | 17 |
| 2.12 | Valores da máscara espectral do terminal móvel LTE 900, para categoria B nas bandas 3 e 8 (Largura de banda = 1.4, 3, 5, 10, 15 e 20 MHz) [6]. | 17 |
| 2.13 | Valores da máscara espectral da estação base 5G, para categoria B nas bandas 3, 5, 8, 12, 20, 28 e 71 (Largura de banda = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 90 e 100 MHz) [19]. | 22 |

| | | |
|------|--|----|
| 2.14 | Valores da máscara espectral do terminal móvel 5G, (Largura de banda = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 90 e 100 MHz) [20]). | 22 |
| 3.1 | Níveis de ACS para as três primeiras portadoras adjacentes. | 41 |
| 3.2 | Comparação de MCL para <i>Downlink</i> | 55 |
| 3.3 | Comparação de MCL para <i>Uplink</i> | 55 |
| 3.4 | Isolamento para evitar bloqueio do terminal e estação base GSM-R por parte da estação base UMTS/LTE. | 57 |
| 3.5 | Isolamento para evitar bloqueio do terminal e estação base GSM-R por parte da estação base 5G. | 58 |
| 4.1 | Portadoras TCH do GSM-R na Linha de Cascais. | 60 |
| 4.2 | Tabela de mapeamento de <i>RxQual</i> para <i>C/I</i> [25]). | 70 |
| 4.3 | Portadoras TCH do GSM-R na Linha de Cascais depois de alteradas. | 78 |

Lista de Acrónimos

| | |
|----------------|--|
| 3GPP | <i>Third Generation Partnership Project.</i> |
| 5G NR | <i>5G - New Radio.</i> |
| ACIR | <i>Adjacent Channel Interference Ratio.</i> |
| ACLR | <i>Adjacent Channel Power Leakage Ratio.</i> |
| ACPR | <i>Adjacent Channel Power Ratio.</i> |
| ACS | <i>Adjacent Channel Selectivity.</i> |
| ARFCN | <i>Absolute Radio Frequency Channel Number.</i> |
| BCCH | <i>Broadcast Control Channel.</i> |
| BSIC | <i>Base Station Identity Code.</i> |
| BTS | <i>Base transceiver station.</i> |
| CEPT | <i>European Conference of Postal and Telecommunications Administrations.</i> |
| DEM | <i>Digital Elevation Model.</i> |
| ECC | <i>Electronic Communications Committee.</i> |
| EDGE | <i>Enhanced Data Rates For GSM Evolution.</i> |
| E-GSM | <i>Extendend Global System for Mobile Communications.</i> |
| E-GSM-R | <i>Extendend Global System for Mobile Communications-Railways.</i> |
| EIRENE | <i>European Integrated Railway Radio Enhanced Network.</i> |
| EIRP | <i>Effective Isotropic Radiated Power.</i> |

| | |
|--------------|--|
| ETCS | <i>European Train Control System.</i> |
| ETSI | <i>European Telecommunications Standards Institute.</i> |
| FDD | <i>Frequency Division Duplex.</i> |
| FDMA | <i>Frequency Division Multiple Access.</i> |
| FRMCS | <i>Future Railway Mobile Communication System.</i> |
| FSU | <i>Fixed Side Unit.</i> |
| GPRS | <i>General Packet Radio Services.</i> |
| GPS | <i>Global Positioning System.</i> |
| GSM | <i>Global System for Mobile Communications.</i> |
| GSM-R | <i>Global System for Mobile Communications-Railways.</i> |
| HSCSD | <i>High Speed Circuit Switched Data Service.</i> |
| HSDPA | <i>High Speed Downlink Packet Access.</i> |
| HSPA | <i>High Speed Packet Access.</i> |
| HSUPA | <i>High Speed Uplink Packet Access.</i> |
| IoT | <i>Internet of Things.</i> |
| ITU | <i>International Telecommunication Union.</i> |
| LTE | <i>Long Term Evolution.</i> |
| MCL | <i>Maximum Coupling Loss.</i> |
| MIMO | <i>Massive Multiple Input Multiple Output.</i> |
| MS | <i>Mobile Station.</i> |
| OBE | <i>Out-of-Band Emissions.</i> |
| OBU | <i>On Board Unit.</i> |
| OFDM | <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing.</i> |
| PK | <i>Ponto Quilométrico.</i> |
| QoS | <i>Quality of Service.</i> |
| RB | <i>Resource Block.</i> |

| | |
|----------------|---|
| SC-FDMA | <i>Single-carrier FDMA.</i> |
| TCH | <i>Traffic Channel.</i> |
| TDD | <i>Time Division Duplex.</i> |
| TDMA | <i>Time Division Multiple Access.</i> |
| UMTS | <i>Universal Mobile Telecommunication System.</i> |
| WCDMA | <i>Wideband Code Division Multiple Access.</i> |
| WiMAX | <i>Worldwide Interoperability for Microwave Access.</i> |

Lista de Símbolos

| | |
|-------------------------|---|
| Δf | Desvio entre portadoras. |
| γ | Interferência permitida. |
| $ACIR$ | Valor de <i>Adjacent Channel Interference Ratio</i> (ACIR) correspondente ao Δf e à tecnologia interferente. |
| $ACLR_{200\text{ kHz}}$ | Valor de <i>Adjacent Channel Power Leakage Ratio</i> (ACLR) sobre a banda GSM-R para uma largura de banda de 200 kHz. |
| ACS | <i>Adjacent Channel Selectivity</i> . |
| F | <i>Noise factor</i> . |
| $f_{Interferente}$ | Portadora da interferente. |
| f_{vitima} | Portadora da vítima. |
| G_a | Ganho da antena. |
| K | Constante de Boltzmann, dada por $1.381 \times 10^{-23} J/K$. |
| KT | Densidade de ruído térmico dada por 174 dBm/Hz. |
| L_c | Atenuação dos cabos. |
| LB_{CHM} | Largura de banda do canal de medida. |
| LB_{GSM-R} | Largura de banda do GSM-R. |
| M | Degradação na sensibilidade devido à presença de interferência (nível de sinal recebido - sensibilidade). |

| | |
|-----------------------------|---|
| N | Potência de ruído. |
| OBE | Emissões fora-de-banda. |
| OBE_{linear} | Emissões fora-de-banda em valores lineares. |
| $P_{in\ band}$ | Potência máxima transmitida pela BTS <i>Universal Mobile Telecommunication System</i> (UMTS) 900. |
| P_{int-T} | Nível de interferência presente à entrada do recetor, na condição de teste - nível de bloqueio. |
| $P_{int\ GSM - R}$ | Potência interferente proveniente do GSM-R. |
| $P_{int\ UMTS}$ | Potência interferente proveniente do UMTS. |
| P_{int} | Potência interferente. |
| $P_{int\ Total}$ | Potência interferente total. |
| $P_{out\ band\ (30\ kHz)}$ | Potência fora-de-banda para uma largura de banda de 30 kHz. |
| $P_{out\ band\ (200\ kHz)}$ | Potência fora-de-banda para uma largura de banda de 200 kHz. |
| P_{out} | Potência de saída do emissor. |
| P_{rxI} | Potência de receção no terminal móvel proveniente das interferentes. |
| P_{rxV} | Potência de receção no terminal móvel proveniente das vítimas. |
| P_{rx} | Potência de receção. |
| R_M | Requisitos mínimos das bandas I, II e III (Ver Tabelas 2.7 e 2.8). |
| T | Temperatura do recetor. |



Introdução

Neste capítulo será feita uma breve introdução ao tema tratado neste trabalho, realizando-se o enquadramento do problema e definindo-se os objetivos gerais da dissertação. Para além disso, ainda é feita a revisão bibliográfica, apresentados os objetivos da dissertação e a organização do documento.

1.1 Enquadramento

Os caminhos de ferro são, desde sempre, grandes utilizadores de sistemas de comunicações móveis devido à necessidade absoluta de comunicações rádio entre os diversos intervenientes nas operações ferroviárias, associada à elevada mobilidade dos comboios.

Em 1993, os caminhos de ferro decidiram utilizar o *Global System for Mobile Communications* (GSM) como a tecnologia base para o desenvolvimento da nova geração de sistemas de rádio comunicações. Para além das razões técnicas e económicas, a escolha do GSM, deveu-se à sua grande robustez e fiabilidade ao nível da transmissão rádio. No entanto, e uma vez que esta tecnologia não cumpria todos os requisitos necessários para um serviço eficiente de transporte ferroviário, foram efetuadas alterações que deram origem a um novo sistema denominado por GSM-R.

Este novo sistema, ainda nos dias de hoje, é a tecnologia de suporte das comunicações móveis ferroviárias, sendo obrigatória e interoperável ao nível europeu e

utilizada por gestores de infraestruturas e operadores ferroviários. Estes sistemas são considerados como sistemas críticos, dada a sua importância na exploração e segurança ferroviária, principalmente na situação de *European Train Control System* (ETCS) nível 2 e superior, que implicam transmissão de dados de sinalização através de GSM-R. A criticidade das comunicações implica que a fiabilidade, disponibilidade e segurança sejam aspetos cruciais e desafios a considerar em qualquer rede de comunicações ferroviárias. É esperado que esta tecnologia dure até ao ano de 2030, data em que existirá transição para uma nova tecnologia de redes ferroviárias denominada por *Future Railway Mobile Communication System* (FRMCS) [1].

Por outro lado, o licenciamento da utilização de espectro, a par de um novo paradigma de neutralidade tecnológica respeitante à utilização das diferentes bandas do espectro radioelétrico, implicam que diversos operadores tenham utilizado as faixas em torno da faixa de comunicações ferroviárias para a operação em tecnologias de banda larga, quer seja o UMTS ou o *Long Term Evolution* (LTE) ou mesmo o *5G - New Radio* (5G NR).

Nos países pertencentes à *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations* (CEPT), as bandas de frequência 880 - 915 MHz (*Uplink*) e 925 - 960 MHz (*Downlink*) são alocadas para serviços móveis e atualmente são usadas por redes como o GSM e UMTS, mas também são planeadas para serem utilizadas em LTE e, no futuro, em outras redes móveis públicas.

As bandas de frequência 876 - 880 MHz (*Uplink*) e 921 - 925 MHz (*Downlink*) (banda GSM-R) são identificadas na CEPT para a comunicação operacional de empresas ferroviárias GSM-R. Além disso, as faixas de frequência 873 - 876 MHz (*Uplink*) e 918 - 921 MHz (*Downlink*) (banda *Extendend Global System for Mobile Communications* (E-GSM)) também podem ser utilizadas para GSM-R numa base nacional.

Recentemente, e como é possível verificar na Figura 1.1, existe um grande crescimento da tecnologia GSM-R. Isto significa que do total de 221,025 km da rede ferroviária existente na Europa, 149,673 km estão previstos serem cobertos com GSM-R, o que, estatisticamente, significa 67,7 % da rede ferroviária europeia. Posto isto, algumas operadoras GSM-R notaram limitações operacionais causadas por interferências provenientes de outras redes móveis. Assim sendo, depois de vários operadores públicos e GSM-R, de alguns países, terem cooperado em diversos estudos, chegou-se à conclusão de que existem técnicas que possibilitam

a redução da interferência entre redes. No futuro, o número de casos de interferência poderá aumentar cada vez mais, devido ao crescimento esperado das redes GSM-R e ao potencial crescimento de redes móveis públicas. Além disso, as redes móveis públicas podem sofrer com as emissões de estações base GSM-R quando estas operam em frequências adjacentes ou se encontram nas proximidades em termos geográficos.

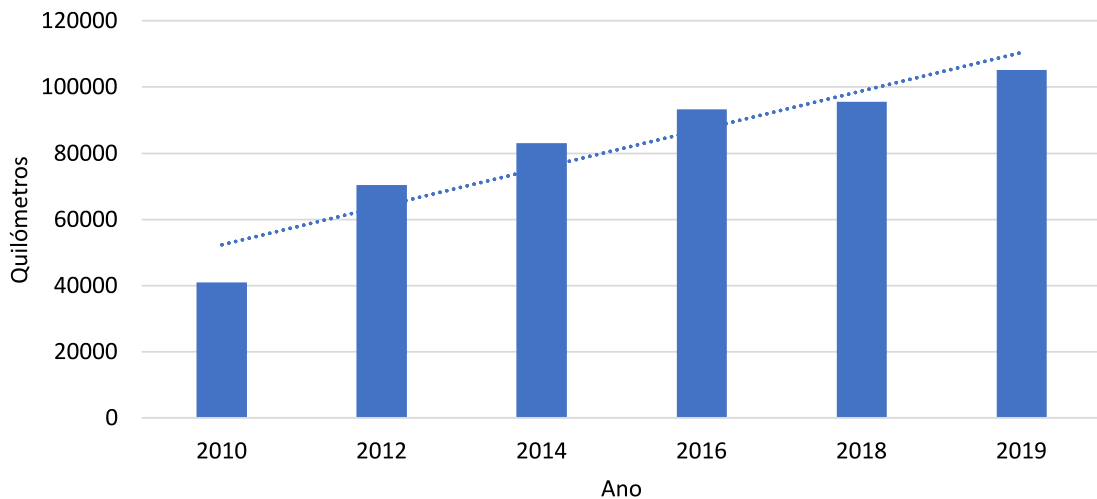


Figura 1.1: Implementação das redes GSM-R no Mundo por ano [2].

Uma vez encontrado este problema, várias empresas e engenheiros de telecomunicações realizaram vários testes de modo a encontrar soluções e mais tarde chegaram à conclusão de que existem técnicas para reduzir estas interferências. Uma vez que tanto as redes públicas como as redes GSM-R só tendem a crescer leva a que esta interferência também aumente, logo é necessário mitigar da melhor maneira este fenómeno de modo a que ambas as redes possam coexistir.

1.2 Motivação

Antes de se iniciar a implementação de qualquer rede rádio, é necessário realizar o planeamento celular. Um dos passos fundamentais no planeamento de uma rede rádio é o planeamento de frequências a serem utilizadas por cada célula. Este processo é necessário para mitigar o efeito da interferência, tanto proveniente da própria rede como de redes já existentes e que têm de coexistir em simultâneo. Em comunicações móveis ferroviárias, dado o seu nível de exigência, é necessário fazer esta caracterização de um modo mais rigoroso.

Além disso, também é de grande importância conseguir estimar o impacto que a localização dos sites das redes públicas terão no planejamento do GSM-R, quer em termos da própria localização dos sites GSM-R, quer nas escolhas das frequências. Feito este estudo, é possível mitigar os problemas causados pelas redes públicas, de modo a existir uma coexistências entre redes.

1.3 Estado da Arte

Dados os problema já reportados por diferentes operadores de infraestrutura ferroviária a nível europeu, foram já desenvolvidos alguns trabalhos nesta área.

O relatório *Electronic Communications Committee* (ECC) 162 [3], concentra-se na coexistência entre redes móveis públicas que operam na faixa dos 900 MHz e redes GSM-R que operam tanto na banda GSM-R (876 - 880 MHz / 921 - 925 MHz) quanto na banda *Extendend Global System for Mobile Communications-Railways* (E-GSM-R) (873-876 MHz / 918 - 921 MHz).

A CEPT já realizou estudos de coexistência tendo em conta os limites de frequência (ou seja, a 880 MHz e a 925 MHz) entre o GSM-R e as redes públicas móveis, pelo que os resultados existentes foram utilizados como base para este relatório, com complementos adicionados para alguns deles:

- ECC 082 [4] 096 [5] - Compatibilidade entre UMTS 900 e GSM-R.
- CEPT 41 [6] - Compatibilidade entre LTE/*Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX) 900 e GSM-R.

Este relatório fornece orientação para melhorar a coexistência entre redes GSM-R e redes móveis públicas e descreve possíveis técnicas de mitigação que podem ser consideradas pelas administrações e operadores nacionais, de ambos os lados, para resolver casos de interferência entre GSM-R e redes móveis públicas. Em geral, o uso de técnicas de mitigação deve limitar-se aos casos necessários, a fim de evitar restrições indevidas nas duas redes e facilitar o uso eficiente do espectro.

O relatório ECC 96 [5], trata do estudo de compatibilidade entre o UMTS 900 / 1800 e os sistemas que operam em bandas adjacentes. Este relatório fornece a descrição da metodologia do estudo de compatibilidade, cenários de coexistência, suposições de simulação e os resultados para a implantação do UMTS operando nas bandas de 900 MHz e 1800 MHz, tendo em consideração os sistemas

a operarem em bandas adjacentes. Embora tenham sido envidados os melhores esforços para fornecer suposições e resultados para abranger a maior variedade de situações possíveis, pode haver alguns casos específicos de cada país em que diferentes suposições precisam ser feitas. Além disso, deve-se notar que, com base na experiência operacional, outras análises podem ter que ser realizadas.

O relatório ECC 82 [4], apresenta a metodologia do estudo de partilha, cenários de coexistência, hipóteses de simulação e ainda fornece resultados de simulações realizadas para a implementação de UMTS a operar nas faixas de 900 MHz e 1800 MHz em áreas urbanas e rurais. Com base na análise destes resultados, pode-se concluir que o UMTS 900/1800 pode ser implementado em zonas urbanas, suburbanas e rurais e poderá existir coexistência com o UMTS e/ou GSM, desde que verificadas algumas condições.

Por fim, o relatório CEPT 41 [6], é constituído pelas condições técnicas que permitem às redes LTE e possivelmente a outras tecnologias, operarem dentro das bandas 880-915 MHz / 925-960 MHz e 1710-1785 MHz / 1805-1880 MHz (900/1800 MHz). A análise realizada neste relatório permite concluir que a introdução de redes LTE e WiMAX nas bandas de 900 e 1800 MHz não deve causar qualquer impacto adicional nos serviços adjacentes, nomeadamente nas redes GSM-R. Assim sendo, as seguintes conclusões podem ser tiradas (apenas são apresentadas as conclusões do impacto nas redes GSM-R):

1.4 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação passa por estimar o impacto que a interferência proveniente das redes públicas terão sobre a tecnologia GSM-R. Para isso serão estimados os efeitos provocados pelas tecnologias de redes públicas atualmente existentes, como o GSM, UMTS ou LTE. Será ainda incluída no estudo a tecnologia 5G NR.

Para além deste estudo, serão validados os cálculos através de medidas realizadas em redes GSM-R reais, efetuando-se o cálculo que impacto que redes existentes nas faixas adjacentes terão sobre essas redes GSM-R, bem como identificadas medidas que poderão mitigar esse impacto.

1.5 Organização do documento

A organização desta dissertação divide-se em quatro capítulos, à exceção do primeiro capítulo, onde é realizada uma breve introdução, enquadramento do tema abordado e dos problemas relacionados e também é exposta a revisão bibliográfica.

No Capítulo 2 são descritos todos os aspetos sobre as tecnologias de acesso rádio relevantes para o desenvolvimento do trabalho, fornecendo informação técnica e científica para compreensão do mesmo.

No Capítulo 3 são apresentadas as causas de interferência, sendo enunciadas todas as metodologias teóricas necessárias, para o devido cálculo da interferência. Ainda é feita o estudo de qual tecnologia (UMTS, LTE e 5G NR) é mais prejudicial, tendo em conta a coexistência com o GSM-R. Também são explorados três fenómenos diferentes que podem contribuir para uma degradação do *Quality of Service* (QoS) nas redes GSM-R por partes das redes dos operadores públicos.

No Capítulo 4 é caracterizado o cenário de estudo, é apresentada a ferramenta desenvolvida para o cálculo da interferência, assim como explicados os cálculos e a metodologia necessária para a predição da interferência causada pelos operadores públicos no GSM-R e por fim são apresentados os resultados obtidos de todos os testes realizados e ainda é feita a devida validação com medidas reais.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e as propostas de trabalho futuro.

1.6 Contribuições originais deste trabalho

Com a realização desta dissertação foi submetida a comunicação seguinte

André Rouco, Nuno Cota, Ana Rita Beire e António Serrador. Public Mobile Wideband Networks Interference Impact Assessment on Railways GSM-R Network.

para a 28th International Conference on Telecommunications (ICT2021) a realizar em 1 - 3 junho, Londres, Reino Unido.

2

Tecnologias de Acesso Rádio

Neste capítulo são abordados os aspetos importantes para o desenvolvimento do trabalho, que passa pela apresentação das características das tecnologias utilizadas ao longo do mesmo, características estas que são importantes para a implementação do cálculo da interferência.

2.1 *Global System for Mobile Communications*

Na Europa, o sistema opera nas bandas dos 900 e 1800 MHz, mas devido à eficiência das tecnologias mais recentes, como o LTE e muito em breve o 5G NR, o Organismo de Reguladores Europeus de Comunicações Eletrónicas (BEREC) optaram por libertar a banda dos 1800 MHz.

Nos dias de hoje, esta tecnologia encontra-se globalmente implementada e é o principal recurso de comunicação de voz, tendo em conta que oferece todas as ferramentas necessárias aos operadores.

O método que é utilizado pelo GSM para gerir as frequências é uma combinação de duas tecnologias, o *Time Division Multiple Access* (TDMA) e o *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), é possível ver na Figura 2.1 um esquema de como funciona este processo.

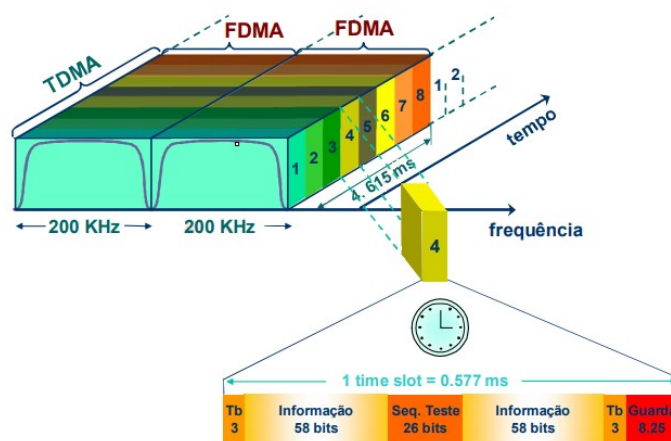


Figura 2.1: Esquema do canal físico do GSM

O FDMA divide os 25 MHz disponíveis de frequência em 124 canais com uma largura de banda de 200 kHz. Uma ou mais destas frequências é atribuída a cada estação base e dividida novamente, mas agora no domínio do tempo utilizando o TDMA, em oito espaços de tempo denominados por *timeslots*.

O terminal móvel utiliza um *timeslot* para recepção e outro para emissão. Estes encontram-se separados temporalmente para que o terminal não esteja a receber e transmitir ao mesmo tempo. Esta divisão de tempo pode ser denominada por *full rate*. As redes também podem dividir as frequências em 16 *timeslots*, processo designado como *half-rate*, mas a qualidade da transmissão é inferior, face à anterior.

Nos anos 90, altura em que o GSM começou a ser utilizado pelos operadores, o ritmo de transmissão máxima para serviços era de 9,6 kbps e, tendo em conta que este valor era bastante reduzido, foi necessário aumentar a taxas de dados, o que levou à introdução de novas *releases* sendo a primeira o *High Speed Circuit Switched Data Service* (HSCSD).

A introdução do HSCSD, levou a um aumento do débito para 115 kbps caso os oito *timeslots* estivessem alocados para o mesmo utilizador [7].

A próxima solução a surgir foi o *General Packet Radio Services* (GPRS), que na altura permitiu aumentar o débito para 171 kbps o que possibilitava suportar transferências intermitentes de dados e transmissão ocasional de grandes volumes.

Por último surgiu o *Enhanced Data Rates For GSM Evolution* (EDGE) que teve como principal função o aumento da eficiência do sistema GPRS permitindo aumentar o débito para 384 kbps por utilizador. É de salientar, que os débitos referidos anteriormente são débitos teóricos.

Relativamente ao GSM 900, são apresentados na Tabela 2.1 os principais parâmetros utilizados por esta tecnologia.

Tabela 2.1: Principais parâmetros da tecnologia GSM [3].

| GSM 900 | | |
|---|-----------------|----------------|
| Banda de Frequências em <i>downlink</i> [MHz] | 925 - 960 | |
| Banda de Frequências em <i>uplink</i> [MHz] | 880 - 915 | |
| Separação entre portadoras [kHz] | 200 | |
| Emissor | Estação Base | Terminal Móvel |
| Potência máxima de emissão [dBm] | 43 | 33 |
| Máscara espectral e emissões espúrias | TS45.005 [8] | |
| Recetor | Estação Base | Terminal Móvel |
| Figura de Ruído [dB] | 8 | 10 |
| Nível de Ruído Térmico [dBm] | - 121 | -121 |
| Sensibilidade de Referência [dBm] | - 104 | - 102 |
| ACS [dB] Primeiro Canal | 18 | 18 |
| ACS [dB] Segundo Canal | 50 | 50 |
| Raio da Célula [Km] | 2.4 (rural) | 2.4 (rural) |
| | 0.6 (urbano 1) | 0.6 (urbano 1) |
| | 1.4 (urbano 2) | 1.4 (urbano 2) |
| Número de portadoras por estação base | 4 (tipicamente) | - |
| Separação de frequências entre portadoras [kHz] (No pior caso a última portadora é colocada no limite da banda de emissão) | 600 | |

2.2 *Global System for Mobile Communications - Railway*

Tendo em conta que o mundo dos transportes ferroviários necessita de uma rede dedicada, independente das redes públicas, as bandas de frequência 876-880 MHz (*uplink*) e 921-925 MHz (*downlink*) foram escolhidas para utilização dos operadores europeus de telecomunicações ferroviárias.

O GSM-R suporta serviços de gestão de redes ferroviárias, tais como comandar e controlar o tráfego gerado por comboios a velocidades até 500 km/h e ainda suporta comunicações de voz. A interface rádio utilizada no GSM-R é baseada no GSM.

Os principais parâmetros que irão ser considerados no presente estudo estão representados na Tabela 2.2, com base nas especificações técnicas TS 45.005 [9].

Tabela 2.2: Principais parâmetros da tecnologia GSM-R [3].

| | GSM-R | | |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------------|---------------------------|
| | Estação Base | Terminal Móvel Portátil | Terminal Móvel Cab. Radio |
| Banda de Frequência [MHz] | 876-880 / 921-925 | | |
| Separação entre portadoras [kHz] | 200 | | |
| Modulação | GMSK | | |
| Potência máxima de emissão [dBm] | 45 | 39 | 9 |
| Ruído térmico [dBm] | -121 | -121 | -121 |
| Figura de ruído [dB] | 5 | 9 | 7 |
| Sensibilidade [dBm] | -110 | -102 | -104 |
| Relação C/I mínima - voz [dB] | 9 | 9 | 9 |
| Relação C/I mínima - dados [dB] | 12 | 12 | 12 |
| Altura da antena [m] | 20 - 30 | 1.5 | 4.0 |
| Ganho da antena [dBi] | 18 | 0 | 2 |
| Atenuação cabos e conectores [dB] | 3 | 0 | 2 |
| Máscara espectral e emissões espúrias | 3GPP TS45.005 | | |

Na Tabela 2.3 definem-se as máscaras espectrais para as estações base GSM-R, para uma potência de emissão superior a 43 dBm, de forma a estimar as emissões fora-de-banda para o caso mais pessimista (BTS a radiar na potência máxima). De salientar que o Δf corresponde ao espaçamento entre o centro da portadora do canal GSM-R e o centro do canal de medida, enquanto os requisitos mínimos é o valor máximo de potência admissível (em 30 kHz) para Δf fora da banda do canal.

Tabela 2.3: Valores da máscara espectral da BTS GSM-R, para $P \geq 43$ dBm [8].

| Desvio de frequência Δf [MHz] | Requisito mínimo [dBm] | LB do canal de medida |
|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| $0 \leq \Delta f < 0.2$ | 0.5 | 30 kHz |
| $0.2 \leq \Delta f < 0.250$ | -30 | 30 kHz |
| $0.250 \leq \Delta f < 0.4$ | -33 | 30 kHz |
| $0.4 \leq \Delta f < 0.6$ | -60 | 30 kHz |
| $0.6 \leq \Delta f < 1.2$ | -70 | 30 kHz |
| $1.2 \leq \Delta f < 1.8$ | -73 | 30 kHz |
| $1.8 \leq \Delta f < 6.0$ | -75 | 1 MHz |
| $\Delta f \geq 6.0$ | -73 | 1 MHz |

Na Tabela 2.3, é possível identificar a potência emitida fora-de-banda consoante o desvio entre a portadora do canal utilizado pela BTS GSM-R e o canal de medida utilizado para medir os valores presentes na tabela. Ainda é possível observar que, consoante o desvio entre portadoras a largura do canal de medida também pode sofrer alterações. Este assunto será mais aprofundado no Capítulo 3.

Nas Tabelas 2.4 e 2.5 são apresentados os níveis de bloqueio dos *Mobile Station* (MS) e *Base transceiver station* (BTS) GSM-R e os níveis de proteção especificados para a interferência canal-adjacente, respetivamente. Estes valores irão ser importantes para calcular a seletividade, tanto da BTS como do MS GSM-R.

Tabela 2.4: Características de bloqueio do GSM-R [9].

| Banda de Frequências | GSM-R | | | | | |
|--|------------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| | <i>other MS</i> | | <i>small MS</i> | | BTS | |
| | $\text{dB}\mu\text{V}$ | dBm | $\text{dB}\mu\text{V}$ | dBm | $\text{dB}\mu\text{V}$ | dBm |
| <i>In-Band</i> | | | | | | |
| $600\text{kHz} \leq f - f_0 < 800\text{kHz}$ | 75 | -38 | 70 | -43 | 87 | -26 |
| $800\text{kHz} \leq f - f_0 < 1.6\text{MHz}$ | 80 | -33 | 70 | -43 | 97 | -16 |
| $1,6\text{MHz} \leq f - f_0 < 3\text{MHz}$ | 90 | -23 | 80 | -33 | 97 | -16 |
| $3\text{MHz} \leq f - f_0 $ | 90 | -23 | 90 | -23 | 100 | -13 |
| <i>out-of-band</i> | | | | | | |
| | 113 | 0 | 113 | 0 | 121 | 8 |

Tabela 2.5: Níveis Mínimos de proteção C/I (voz) [9].

| | | |
|---|------------|--------|
| Interferência co-canal | C/I_c | 9 dB |
| Interferência canal adjacente (200 kHz) | C/I_{a1} | -9 dB |
| Interferência canal adjacente (400 kHz) | C/I_{a2} | -41 dB |
| Interferência canal adjacente (600 kHz) | C/I_{a3} | -49 dB |

Além dos parâmetros definidos na norma, consideram-se os níveis de qualidade de serviço mínimos estabelecidos nas especificações *European Integrated Railway Radio Enhanced Network* (EIRENE) [10], designadamente a sensibilidade e probabilidade de cobertura para *Cab Radio*:

- Probabilidade de cobertura de 95 % em cada intervalo de 100 metros;
- Níveis mínimos obrigatórios:

- -98 dBm para serviços de voz e dados normais;
- -95 dBm para linhas com (*European Train Control System*) ETCS nível 2/3 para velocidade até 220 km/h;

2.3 *Universal Mobile Telecommunications System*

Com o avanço da *internet* e com a necessidade de atingir maiores velocidades face à tecnologia GSM surgiu o UMTS, termo utilizado para definir todas as tecnologias rádio 3G desenvolvidas no *Third Generation Partnership Project* (3GPP). A terceira geração veio oferecer tráfego de alta velocidade no acesso à *internet*, tornando possível a existência de serviços como o envio de imagens e vídeo-conferências de alta qualidade.

A tecnologia rádio usada para fornecer acesso múltiplo aos recursos da rede é o *Wideband Code Division Multiple Access* (WCDMA) [11]. Numa primeira fase esta tecnologia utilizava a banda de frequência dos 1920-1980 MHz para *uplink* e 2110-2170 MHz para *downlink*, tendo canais de 5 MHz de largura de banda com taxas até 2 Mbps para utilizadores com pouca mobilidade e até 144 kbps em situações de alta mobilidade. Mais tarde, foram adicionadas novas bandas pela *International Telecommunication Union* (ITU), como a dos 806-960 MHz, 1710-1885 MHz, 2500-2690 MHz.

A *Release 99* foi a primeira versão das especificações da tecnologia 3G. Uma vez que a demanda por maior taxa de dados era uma prioridade para todos os operadores, surgiu o *High Speed Packet Access* (HSPA). No entanto, esta *release* foi feita por etapas. A primeira (*release 5*) introduziu o *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) que permitiu uma maior taxa de transferência de dados variando entre 0,9 e 14,4 Mbps. Na segunda etapa (*release 6*), foi introduzido o *High Speed Uplink Packet Access* (HSUPA) que permitiu uma taxa de transferência de dados de 0,72 a 5,76 Mbps. Por fim, o HSPA evoluiu para o HSPA+ na *release 7*, trazendo melhorias ao nível do atraso, capacidade e cobertura, o que contribuiu para o aumento das velocidades de transmissão de dados até 42 Mbps.

Relativamente ao UMTS 900, são apresentados na Tabela 2.6 os principais parâmetros utilizados por esta tecnologia. Na Tabela 2.7, são apresentados os valores da máscara de potência máxima fora-de-banda, admitida nas especificações, para o caso de estações base com potência de emissão superior ou igual a 43 dBm (pior caso como explicado anteriormente para o GSM/GSM-R), enquanto na Tabela 2.8 são apresentados os mesmo valores mas para o terminal móvel. Estas tabelas têm

a mesma importância que as tabelas referidas anteriormente para o caso do GSM-R.

Tabela 2.6: Parâmetros principais da tecnologia UMTS 900 [3].

| | UMTS 900 | |
|---|-----------|----------|
| | BS | MS |
| Banda de Frequências em <i>downlink</i> [MHz] | 925 - 960 | |
| Banda de Frequências em <i>uplink</i> [MHz] | 880 - 915 | |
| Separação entre portadoras [kHz] | 5 | |
| Potência máxima de emissão [dBm] | 43 | 21 |
| Máscara espectral e emissões espúrias | TS25.104 | TS25.101 |
| Largura de banda ocupada [MHz] - 99% | 3.84 | 3.84 |
| Potência de Ruído (K.L.B.T) [dBm] | -108 | -108 |
| Figura de Ruído do Recetor [dB] | 5 | 12 |
| Nível de Ruído Térmico do Recetor [dBm] | -103 | -96 |
| Sensibilidade de Referência do Recetor | -121 | -114 |
| Sensibilidade de Referência do Recetor (<i>In-Band</i>) | TS25.104 | TS25.101 |
| Bloqueio no Recetor (<i>Out-of-Band</i>) | TS25.104 | TS25.101 |

Tabela 2.7: Valores da máscara espectral da estação base UMTS 900, para $P \geq 43$ dBm [12].

| Desvio de frequência Δf [MHz] | Requisito mínimo [dBm] | LB do canal de medida |
|---------------------------------------|--|-----------------------|
| $2.5 \leq \Delta f < 2.7$ | -14 dBm | 30 kHz |
| $2.7 \leq \Delta f < 3.5$ | $-14 \text{ dBm} - 15 \left(\frac{\Delta f}{\text{MHz}} - 2.715 \right) \text{ dB}$ | 30 kHz |
| $3.5 \leq \Delta f < 4.0$ | -26 dBm | 30 kHz |
| $4.0 \leq \Delta f < f_{max}$ | -13 dBm | 1 MHz |

Tabela 2.8: Valores da máscara espectral do terminal móvel UMTS 900 [13].

| Desvio de frequência Δf [MHz] | Requisito mínimos ⁽¹⁾ | | LB do canal de medida |
|---------------------------------------|---|----------------|-----------------------|
| | Relativo [dBc] | Absoluto [dBm] | |
| $2.5 \leq \Delta f < 3.5$ | $-35 - 15 \left(\frac{\Delta f}{\text{MHz}} - 2.5 \right)$ | -71.1 | 30 kHz |
| $3.5 \leq \Delta f < 7.5$ | $-35 - 1 \left(\frac{\Delta f}{\text{MHz}} - 3.5 \right)$ | -55.8 | 1 MHz |
| $7.5 \leq \Delta f < 8.5$ | $-39 - 10 \left(\frac{\Delta f}{\text{MHz}} - 7.5 \right)$ | -55.8 | 1 MHz |
| $8.5 \leq \Delta f < 12.5$ | -49 | -55.8 | 1 MHz |

Nota 1: O requisito mínimo é calculado a partir do requisito relativo ou do requisito absoluto, consoante o que for mais elevado.

Tendo em conta o efeito de desvanecimento de multipercurso existente no UMTS, esta nova rede utiliza OFDM para transmissão do sinal. Para transportar dados o OFDM utiliza um grande número de subportadoras para transmissão. Cada subportadora tem 15 kHz, sendo um *Resource Block* (RB), Figura 2.3, um conjunto de 12 subportadoras consecutivas com um total de 180 kHz, o que no domínio do tempo equivale a 7 símbolos OFDM. Dependendo da largura de banda da portadora, o LTE suporta um número variável de RB's.

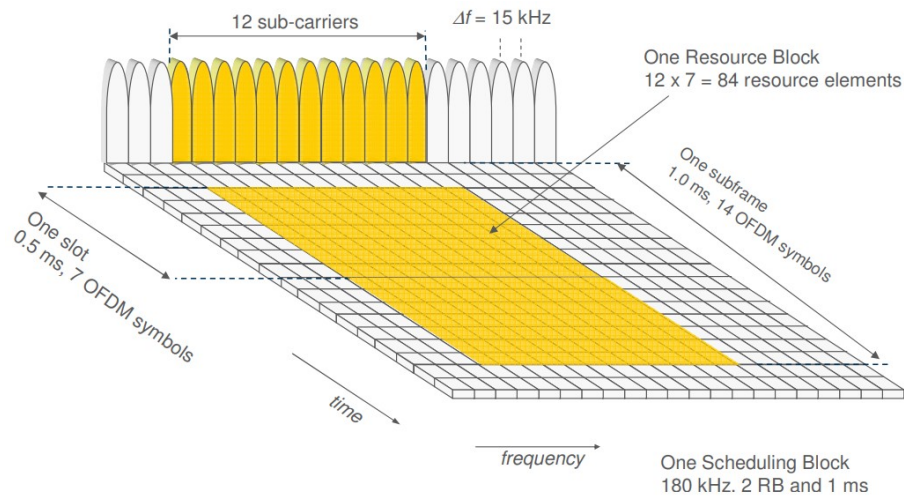


Figura 2.3: *Resource Block*. Extraído de [16].

Relativamente ao LTE 900, são apresentados na Tabela 2.9 os principais parâmetros utilizados por esta tecnologia.

Tabela 2.9: Principais parâmetros da tecnologia LTE [3].

| | UMTS 900 | |
|---|-----------------------|---------------|
| Banda de Frequências [MHz] | 880 - 915 / 925 - 960 | |
| | 1.4 / 1.08 / 6 | |
| | 3 / 2.7 / 15 | |
| Separação entre portadoras [MHz]/ | 5 / 4.5 / 25 | |
| Largura de Banda das Portadoras [MHz]/ | 10 / 9 / 50 | |
| <i>Resource Blocks</i> | 15 / 13.5 / 75 | |
| | 20 / 18 / 100 | |
| Grelha de canais [kHz] | 100 | |
| | BS | MS |
| Potência máxima de emissão [dBm] | 43 | 23 |
| Máscara espectral e Emissões espúrias | TS36.104 | |
| ACLR_1 (Primeiro Canal Adjacente) [dB] | 45 | 30 |
| | | 33 (3.84 MHz) |
| ACLR_2 (Segundo Canal Adjacente) [dB] | 45 | 36 |
| | | - 113.6 |
| | | - 109.7 |
| Temperatura do Recetor (KBT) [dBm] | | - 107.4 |
| | | - 104.4 |
| | | - 102.7 |
| | | - 101.4 |
| Figura de Ruído do Recetor [dB] | 5 | 12 |
| | - 108.6 | - 101.6 |
| Nível de Ruído Térmico do Recetor [dBm] | - 104.7 | - 97.7 |
| | - 102.4 | - 95.4 |
| | - 99.4 | - 92.4 |
| | - 97.7 | - 90.7 |
| | - 96.4 | - 89.4 |

Nas Tabelas 2.10 e 2.11 , são apresentados os valores da máscara de potência máxima fora-de-banda, admitida nas especificações, para o caso de BTS's com potências de emissão superior ou igual a 43 dBm (pior caso como explicado anteriormente para o UMTS), para todas as configurações de largura de bandas disponíveis no LTE e para a categoria B [17] nas bandas 3 e 8, sendo que a banda 8 corresponde à banda do GSM 900, que é banda estudada neste trabalho. É de salientar que Δf corresponde ao desvio de frequência do filtro de medida no ponto a -3 dB

Tabela 2.10: Valores da máscara espectral da estação base LTE 900, para categoria B nas bandas 3 e 8 (Largura de banda = 5, 10, 15 e 20 MHz) [6]).

| Desvio de frequência Δf [MHz] | Requisito mínimo | LB do canal de medida |
|---------------------------------------|--|-----------------------|
| $0.0 \leq \Delta f < 0.2$ | -14 dBm | 30 kHz |
| $0.2 \leq \Delta f < 1.0$ | $-14 \text{ dBm} - 15(\frac{\Delta f}{\text{MHz}} - 0.215) \text{ dB}$ | 30 kHz |
| $1.0 \leq \Delta f < 1.5$ | -26 dBm | 30 kHz |
| $1.5 \leq \Delta f < 10$ | -13 dBm | 1 MHz |
| $10 \leq \Delta f < \Delta f_{max}$ | -15 dBm | 1 MHz |

Tabela 2.11: Valores da máscara espectral da estação base LTE 900, para categoria B nas bandas 3 e 8 (Largura de banda = 1.4 e 3 MHz) [6]).

| Desvio de frequência Δf [MHz] | Requisito mínimo | LB do canal de medida |
|---------------------------------------|--|-----------------------|
| $0.00 \leq \Delta f < 0.05$ | $5 \text{ dBm} - 60(\frac{\Delta f}{\text{MHz}} - 0.015) \text{ dB}$ | 30 kHz |
| $0.05 \leq \Delta f < 0.15$ | $-2 \text{ dBm} - 160(\frac{\Delta f}{\text{MHz}} - 0.065) \text{ dB}$ | 30 kHz |
| $0.15 \leq \Delta f < 0.20$ | -14 dBm | 30 kHz |
| $0.20 \leq \Delta f < 1.00$ | $-14 \text{ dBm} - 15(\frac{\Delta f}{\text{MHz}} - 0.215) \text{ dB}$ | 30 kHz |
| $1.00 \leq \Delta f < \Delta 1.50$ | -26 dBm | 30 KHz |
| $1.50 \leq \Delta f < 10$ | -13 dBm | 1 MHz |
| $10.0 \leq \Delta f < \Delta_{max}$ | -15 dBm | 1 MHz |

Por fim, na Tabela 2.12 são apresentados os mesmo valores mas para o MS. Estas tabelas têm a mesma importância que as tabelas referidas anteriormente para o caso do GSM-R.

Tabela 2.12: Valores da máscara espectral do terminal móvel LTE 900, para categoria B nas bandas 3 e 8 (Largura de banda = 1.4, 3, 5, 10, 15 e 20 MHz) [6]).

| Desvio de frequência Δf [MHz] | 1.4 MHz | 3 MHz | 5 MHz | 10 MHz | 15 MHz | 20 MHz |
|---------------------------------------|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | [dBm] | [dBm] | [dBm] | [dBm] | [dBm] | [dBm] |
| $0.0 \leq \Delta f < 1$ | -10 | -13 | -15 | -18 | -20 | -21 |
| $1.0 \leq \Delta f < 2.5$ | -10 | -10 | -10 | -10 | -10 | -10 |
| $2.5 \leq \Delta f < 2.8$ | -25 | -10 | -10 | -10 | -10 | -10 |
| $2.8 \leq \Delta f < 5$ | | -10 | -10 | -10 | -10 | -10 |
| $5.0 \leq \Delta f < 6$ | | -25 | -13 | -13 | -13 | -13 |
| $6.0 \leq \Delta f < 10$ | | | -25 | -13 | -13 | -13 |
| $10 \leq \Delta f < 15$ | | | | -25 | -13 | -13 |
| $15 \leq \Delta f < 20$ | | | | | -25 | -13 |
| $20 \leq \Delta f < 25$ | | | | | | -25 |

2.5 5G - *New Radio*

A tecnologia 5G é o futuro das comunicações móveis, representando mais um grande passo no que diz respeito às capacidades destas mesmas redes [18]. Até agora, as redes móveis tinham como principal foco oferecer aos clientes serviços para os seus *smartphones*, *tablets*, portáteis, etc. Mas com o aparecimento do 5G, a largura de banda móvel será levado ao extremo em termos de débito, capacidade e disponibilidade de dados. Além disso, permitirá novos serviços como o *Internet of Things* (IoT) e a fiabilidade de comunicações de nível crítico. Os objectivos do 5G são bastante elevados, podendo apresentar débitos de dados até 20 Gbps e aumentos de capacidade até 1000 vezes, com plataformas flexíveis para conectividade de dispositivos, latências ultra-baixas e elevada fiabilidade. É esperado que a chegada do 5G possa ter um impacto fundamental em todos os setores da sociedade, melhorando a eficiência, produtividade e segurança a nível mundial.

Esta nova tecnologia irá ter um impacto bastante significativo em toda a sociedade e empresas, face às tecnologias anteriores, como o 2G (GSM), 3G (UMTS) e 4G (LTE).

A presença de redes IoT foi acrescentada mais tarde, integrada no 4G, enquanto que a sua optimização foi planeada em 5G desde o início, proporcionando melhor desempenho e economia.

Os objetivos das redes 5G, tal como já foi referido anteriormente, estão além das capacidades disponíveis pelas redes existentes nos dias de hoje. Assim sendo, são necessárias novas tecnologias, de modo a cumprir esses mesmos objetivos, tal como é possível visualizar na Figura 2.4.

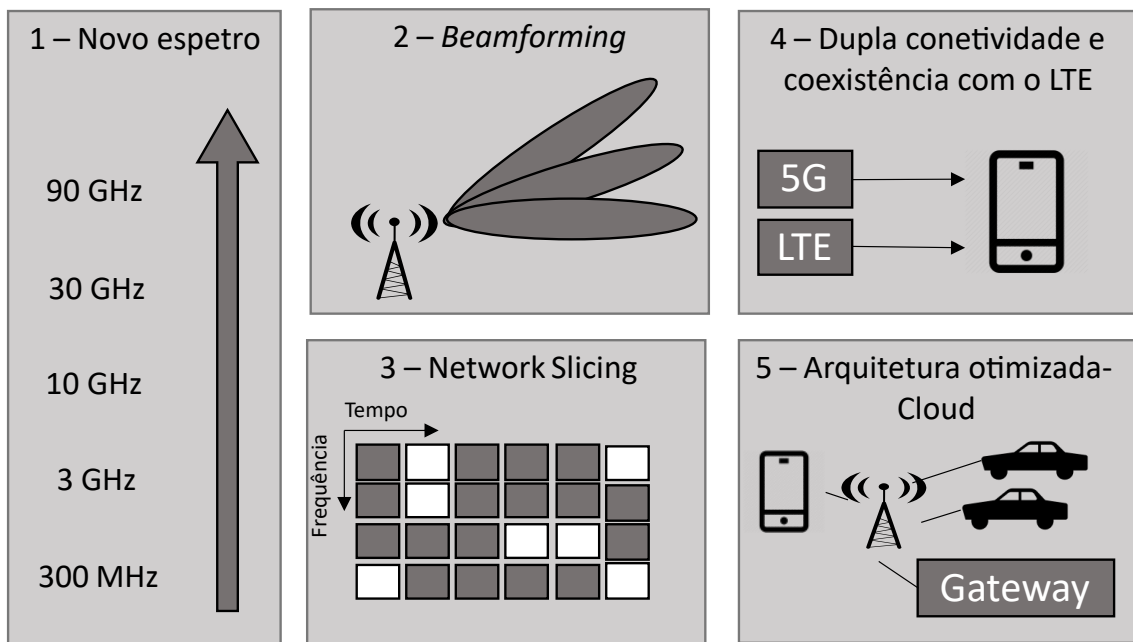


Figura 2.4: Principais objetivos do 5G. Extraído de [18].

1. **Novo Espectro** - O 5G é a primeira tecnologia de comunicações móveis que foi projetada, desde o início, para operar em qualquer banda de frequências entre os 400 MHz e os 90 GHz. As bandas mais baixas são necessárias para garantir a cobertura, enquanto as bandas mais altas são para garantir débitos e capacidade de dados elevados. Existem três diferentes tecnologias usadas pelo 5G dependente da banda usada: nos intervalos entre 2.5 e 5 GHz e entre 24 e 39 GHz utiliza o *Time Division Duplex* (TDD), abaixo dos 2.5 MHz utiliza o *Frequency Division Duplex* (FDD).
2. **Massive Multiple Input Multiple Output (MIMO) beamforming** - Com o uso desta tecnologia é possível aumentar substancialmente a eficiência espectral e a cobertura da rede.
3. **Network Slicing** - As camadas físicas e os protocolos do 5G necessitam de um design o mais flexível possível, de modo a garantir o suporte nos diferentes casos de utilização, diferentes bandas de frequências e para maximizar a eficiência energética e espectral. Isto permite que não seja necessária a construção de redes dedicadas, por parte dos operadores, de modo a suportar estes diferentes casos de utilização.
4. **Dupla conectividade e coexistência com o LTE** - Apesar do 5G poder ser implementado como um sistema completamente autónomo, numa primeira

fase será implementado em conjunto com o LTE. Assim sendo, um dispositivo 5G pode ter ligações rádio simultâneas com redes LTE e 5G. A conectividade dupla pode simplificar a introdução do 5G, aumentar a taxa de dados do utilizador e melhorar a sua fiabilidade. O 5G foi também concebido para a coexistência com o LTE, o que viabiliza a partilha do espectro e simplifica a sua reorganização.

5. **Arquitetura otimizada - Cloud** - A arquitetura atual das redes LTE são totalmente distribuídas por interface rádio e totalmente centralizadas na rede principal. Por outro lado, as redes 5G são especificadas para a implementação de *clouds* nativas, incluindo novas interfaces no interior da rede rádio.

O 5G, desde o início que foi concebido para uma utilização flexível de todas as opções de espectro disponíveis a partir dos 400 MHz até 90 GHz. As três principais opções de espectro são ilustradas na Figura 2.5.

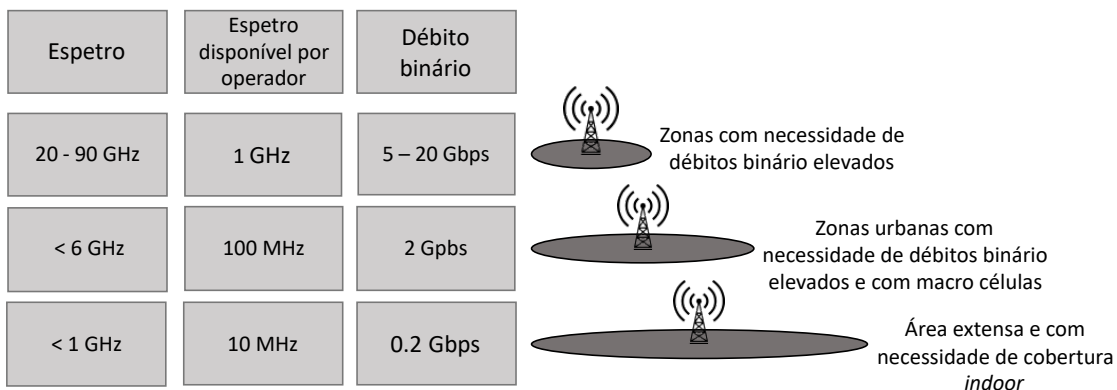


Figura 2.5: Opções de utilização de todo o espectro do 5G. Extraído de [18]

O espectro acima dos 20 GHz pode proporcionar larguras de banda entre 1 e 2 GHz, o que permite alcançar débitos binários bastante elevados com valores a rondar intervalos de 5 a 20 Gbps. Este espectro é principalmente adequado para o uso local, como eventos com um grande aglomerado de dispositivos, *hotspots* exteriores e interiores. Um caso de utilização é o de proporcionar uma capacidade muito elevada aos transportes públicos como por exemplo nas estações de comboios.

O espectro entre os 2.5 e os 5 GHz será utilizado para garantir cobertura e capacidade nas zonas urbanas, reutilizando os locais das estações base existentes. O espectro em torno dos 3.5 GHz é uma grande aposta por parte dos operadores, uma vez que está disponível quase a nível mundial e com larguras de banda a

poder alcançar os 100 MHz ou mais por cada operador. A cobertura do 5G na banda dos 3.5 GHz irá ser muito similar à do LTE 1800 se for utilizado a tecnologia MIMO.

As bandas abaixo dos 3 GHz, para FDD, são necessárias para garantir a cobertura em meio rural em toda a sua extensão, de modo a garantir baixa latência, elevada fiabilidade e maior índice de penetração *indoor*. Será preciso existir uma ampla cobertura na maior área possível de modo a sustentar as novas tecnologias como o IoT e as comunicações de nível crítico. As bandas mais baixas como a dos 700 MHz pode ser uma opção, uma vez que foi disponibilizada em muitos países ao mesmo tempo que o 5G. Outra opção, é a banda dos 900 MHz, que nos dias de hoje é ocupada na sua maioria pelas redes GSM e UMTS. Qualquer outra banda FDD também pode ser utilizada para o 5G e além disso, o LTE e o 5G podem ser implementados na mesma banda utilizando uma solução dinâmica de partilha de espectro. As opções globais do espectro do 5G podem ser visualizadas na Figura 2.6.

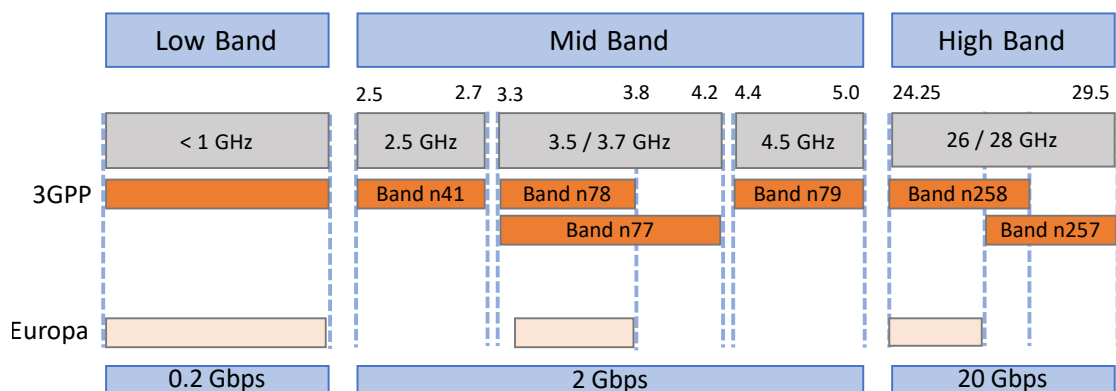


Figura 2.6: Opções de utilização de todo o espectro do 5G na Europa. Extraído de [18].

Por fim, são apresentados nas Tabelas 2.13 e 2.14 os principais parâmetros utilizados pela tecnologia 5G, para todas as configurações de largura de bandas disponíveis no 5G NR e para as bandas 3, 8, 12, 20, 28 e 71 [17], tendo em conta o estudo que irá ser realizado nos capítulos seguintes. É de salientar que Δf corresponde ao desvio de frequência do filtro de medida no ponto a -3 dB.

Tabela 2.13: Valores da máscara espectral da estação base 5G, para categoria B nas bandas 3, 5, 8, 12, 20, 28 e 71 (Largura de banda = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 90 e 100 MHz) [19]).

| Desvio de frequência Δf [MHz] | Requisitos mínimos | LB do canal de medida |
|---------------------------------------|---|-----------------------|
| $0 \leq \Delta f < 5$ | $-7 \text{ dBm} - \frac{7}{5}(\frac{\Delta f}{\text{MHz}} - 0.05) \text{ dB}$ | 100 kHz |
| $5 \leq \Delta f < 10$ | -14 dBm | 100 kHz |
| $10 \leq \Delta f < \Delta f_{max}$ | -15 dBm | 1 MHz |

Tabela 2.14: Valores da máscara espectral do terminal móvel 5G, (Largura de banda = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 90 e 100 MHz) [20]).

| Δf (MHz) | 5 (MHz) [dBm] | 10 (MHz) [dBm] | 15 (MHz) [dBm] | 20 (MHz) [dBm] | 25 (MHz) [dBm] | 30 (MHz) [dBm] | 40 (MHz) [dBm] | 50 (MHz) [dBm] | 60 (MHz) [dBm] | 80 (MHz) [dBm] | 90 (MHz) [dBm] | 100 (MHz) [dBm] | LB de medida [dBm] |
|---------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|
| $0 \leq \Delta f < 1$ | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -24 | -24 | -24 | -24 | -24 | 30 KHz |
| $1 \leq \Delta f < 5$ | -10 | -10 | -10 | -10 | -10 | -10 | -10 | -10 | -10 | -10 | -10 | -10 | 1MHz |
| $5 \leq \Delta f < 6$ | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | 1 MHz |
| $6 \leq \Delta f < 10$ | -25 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | 1 MHz |
| $10 \leq \Delta f < 15$ | -25 | -25 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | 1 MHz |
| $15 \leq \Delta f < 20$ | -25 | -25 | -25 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | 1 MHz |
| $20 \leq \Delta f < 25$ | -25 | -25 | -25 | -25 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | 1 MHz |
| $25 \leq \Delta f < 30$ | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | 1 MHz |
| $30 \leq \Delta f < 35$ | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | 1 MHz |
| $35 \leq \Delta f < 40$ | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | 1 MHz |
| $40 \leq \Delta f < 45$ | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | 1 MHz |
| $45 \leq \Delta f < 50$ | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -13 | -13 | -13 | -13 | -13 | 1 MHz |
| $50 \leq \Delta f < 55$ | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -13 | -13 | -13 | -13 | 1 MHz |
| $55 \leq \Delta f < 60$ | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -13 | -13 | -13 | -13 | 1 MHz |
| $60 \leq \Delta f < 65$ | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -13 | -13 | -13 | 1 MHz |
| $65 \leq \Delta f < 80$ | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -13 | -13 | -13 | 1 MHz |
| $80 \leq \Delta f < 90$ | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -13 | -13 | 1 MHz |
| $90 \leq \Delta f < 95$ | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -13 | 1 MHz |
| $95 \leq \Delta f < 100$ | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -13 | 1 MHz |
| $100 \leq \Delta f < 105$ | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | 1 MHz |

Impacto da Interferência em GSM-R

Uma vez introduzidas as características das tecnologias, necessárias para o desenvolvimento deste trabalho, é possível estimar o impacto que a interferência proveniente dos operadores públicos tem no GSM-R.

Neste capítulo são calculados todos os parâmetros necessários para estimar o impacto que as redes públicas têm sobre o GSM-R. Além disso, são introduzidas as causas da interferência e de todas as redes públicas qual é a mais prejudicial face ao GSM-R.

3.1 Causas de Interferência

Recentemente, alguns operadores europeus de telecomunicações ferroviárias, a operarem GSM-R, têm reportado problemas causados nas comunicações por sinais interferentes com origem na banda adjacente (880-915 / 925-960 MHz), Figura 3.1 [3].

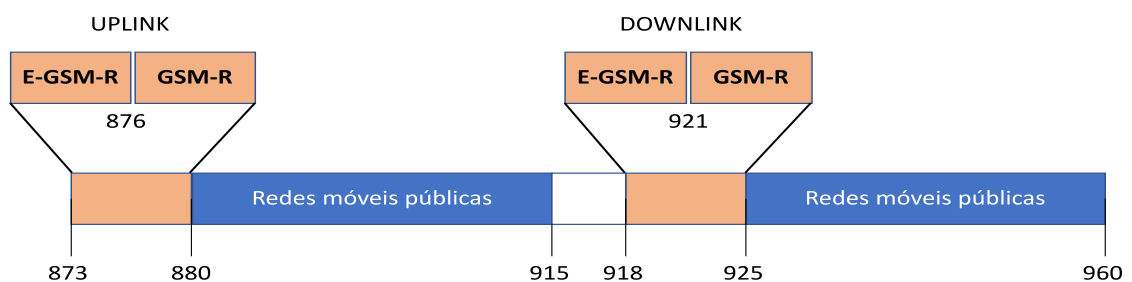


Figura 3.1: Gama de frequências utilizadas no intervalo 873-960 MHz.

Esses problemas têm sido atribuídos principalmente à decisão dos reguladores europeus de autorizarem o funcionamento das tecnologias UMTS e LTE na faixa denominada por E-GSM, reservada anteriormente para suporte da tecnologia GSM. Este fenómeno foi suportado pela extensa campanha de medidas que foi realizada ao longo dos anos, confirmando que os efeitos de bloqueio e de intermodulação provenientes das redes públicas (GSM) afetam a performance dos serviços GSM-R. Verificou-se que as estações base GSM-R sofrem com estes efeitos quando as emissões rádio interferentes excedem um nível de sinal em torno de -40 dBm, como é referido no *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) EN 301 502 [21], para o primeiro canal GSM.

As interferências existem independentemente da potência do sinal recebido e algumas não podem ser atribuídas aos efeitos de intermodulação/bloqueio, logo é necessário ter em conta outros efeitos, tal como o ruído de banda larga que é definido como a largura de banda de um filtro ideal (rectangular) que passa a mesma potência que o verdadeiro filtro.

É possível identificar três tipos de mecanismos, através dos quais sinais interferentes poderão afetar consideravelmente o desempenho de um recetor.

- **Dessensibilização do recetor** - impossibilidade de receber um sinal, devido à presença de sinais interferentes, colocando em causa a relação mínima entre o sinal e a sua interferente (C/I). Estes sinais interferentes poderão ter origem em emissões fora de banda de outros emissores ou em produtos de intermodulação, especialmente os de 3ª e 5ª ordem.
- **Bloqueio no recetor** - efeito provocado por um sinal interferente forte fora-de-banda do recetor o que impossibilita a deteção de um sinal desejado de baixa potência. A resposta de bloqueio do recetor, ou nível de desempenho, é definida como o nível de interferência expresso em dBm, reduzindo a sensibilidade específica do recetor em um certo número de dB's (geralmente 3 dB). Consequentemente, a resposta de bloqueio do recetor é normalmente avaliada num nível de sinal desejado 3 dB acima da sensibilidade do recetor e em frequências diferentes da do sinal desejado.
- **Saturação do recetor** - efeito causado pela presença de dois sinais fortes na antena resultando em produtos de intermodulação nos dispositivos não lineares na cadeia de receção.

Tendo em conta a finalidade desta dissertação serão analisadas as seguintes situações, como é possível ver na Figura 3.2.

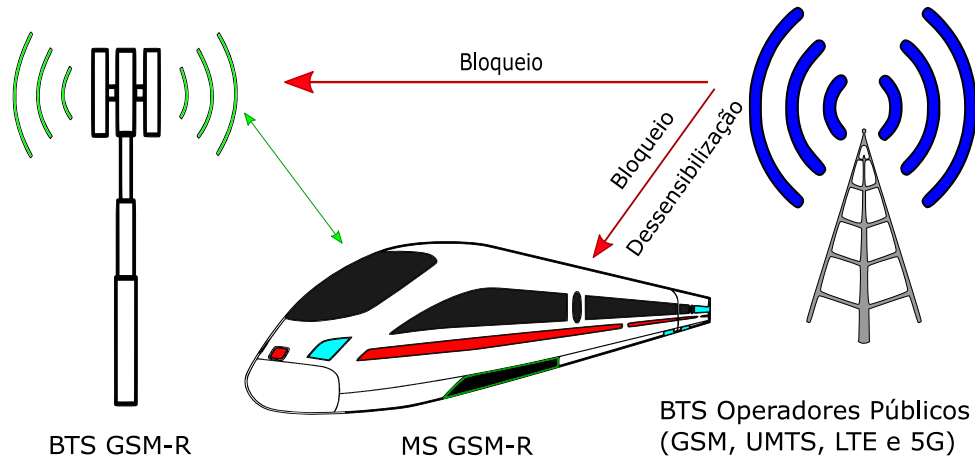


Figura 3.2: Causas de interferência analisadas.

A estação base e o terminal móvel, normalmente admitem um determinado nível de interferência proveniente dos canais adjacentes, sem prejudicar significativamente o desempenho da ligação rádio estabelecida. Esta capacidade de tolerar a interferência é afetada pela seletividade característica do recetor, que representa a capacidade do equipamento filtrar os sinais localizados nas bandas adjacentes, mas principalmente pelas emissões fora-de-banda (*Out-of-Band Emissions* (OBE)) dos emissores potenciais interferentes, a emitirem nas bandas adjacentes.

Assim sendo, é fulcral determinar a capacidade de rejeição de sinal proveniente das bandas adjacentes, que normalmente é descrita pelo parâmetro ACIR, definido como a relação entre a potência total emitida por uma determinada fonte (terminal móvel ou estação base) e a potência efetivamente recebida pelo equipamento recetor (vítima), como é representado (3.1).

$$ACIR = \frac{1}{\frac{1}{ACLR} + \frac{1}{ACS}} \quad (3.1)$$

É possível constatar que o valor de ACIR depende essencialmente do ACLR do emissor e do *Adjacent Channel Selectivity* (ACS) do recetor. Posto isto, é necessário calcular estes parâmetros como é demonstrado de seguida.

3.2 Emissão Fora-de-Banda

Para determinar o nível de interferência proveniente da estação base e do terminal móvel é preciso caracterizar as emissões fora-de-banda, e assim sendo será necessário, em primeiro lugar, caracterizar o ACLR tanto da estação base como

do próprio terminal móvel. O ACLR, também conhecido como *Adjacent Channel Power Ratio* (ACPR), é definido como o rácio entre a potência transmitida dentro da largura de banda do canal atribuído e a potência das emissões indesejadas transmitidas nos canais adjacentes. Cada tecnologia de acesso rádio sem fios tem os canais adjacentes localizados em diferentes frequências, como irá ser demonstrado neste mesmo capítulo. De modo a ser mais fácil compreender este aspeto, segue na Figura 3.3 um exemplo meramente ilustrativo.

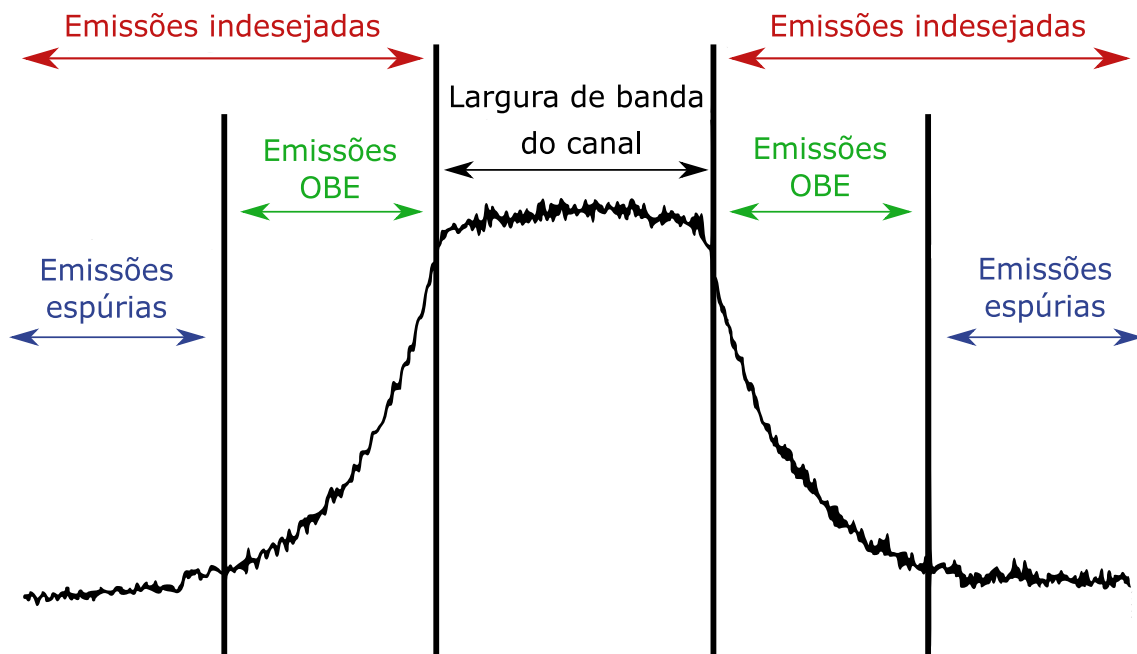


Figura 3.3: Domínio das emissões espúrias.

No caso em estudo, é necessário caracterizar o ACLR e posteriormente o respetivo OBE para as tecnologias GSM-R, UMTS, LTE e 5G NR, assunto detalhado nos próximos subcapítulos.

3.2.1 GSM / GSM-R

De modo a calcular o parâmetro ACLR para o GSM-R, como primeiro passo, é necessário converter os valores presentes na Tabela 2.3 para valores na banda dos 200 kHz, como é representado (3.2).

$$P_{out\ band}(200\ kHz) = P_{out\ band}(30\ kHz) + 10\log_{10}\left(\frac{200}{LB_{CHM}}\right) \quad (3.2)$$

Posto isto, e é aqui que recai a diferença face às outras tecnologias referidas anteriormente, é necessário criar equações que representam a tendência exponencial entre desvios de frequência (este fenómeno só acontece para desvios de frequência entre os 100 e os 600 kHz). De forma a clarificar a afirmação anterior, segue na Figura 3.4 a representação destas curvas assim como as equações que as caracterizam.

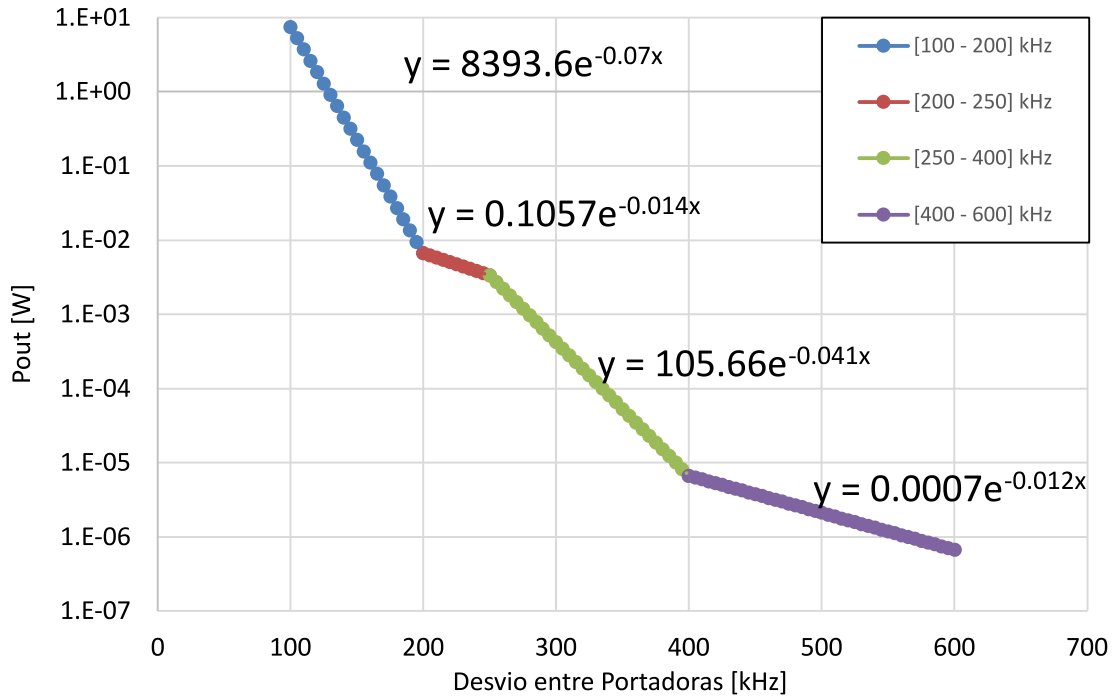


Figura 3.4: Representação das curvas de P_{out} .

No fim de ter todas as equações para todos os desvios mencionados anteriormente, é necessário integrar todo o domínio. Em (3.4) segue um exemplo caso a portadora esteja desviada 200 kHz da portadora de referência.

$$Int_{200kHz} = \int_{100}^{200} 8393.6e^{-0.07x} dx + \int_{200}^{250} 0.1057e^{-0.014x} dx + \int_{250}^{300} 105.66e^{-0.041x} dx \quad (3.3)$$

$$ACLR = 10 \log_{10} \left(\frac{10^{4.3} \times 0.2}{Int_{200kHz}} \right) = 15.61 \text{ dB} \quad (3.4)$$

Como é possível visualizar na (3.3), a integração tem de ser feita com espaçamentos de 200 kHz, tendo em conta a largura de banda do GSM-R.

Assim sendo, na Figura 3.5 seguem os valores de ACLR para o GSM-R.

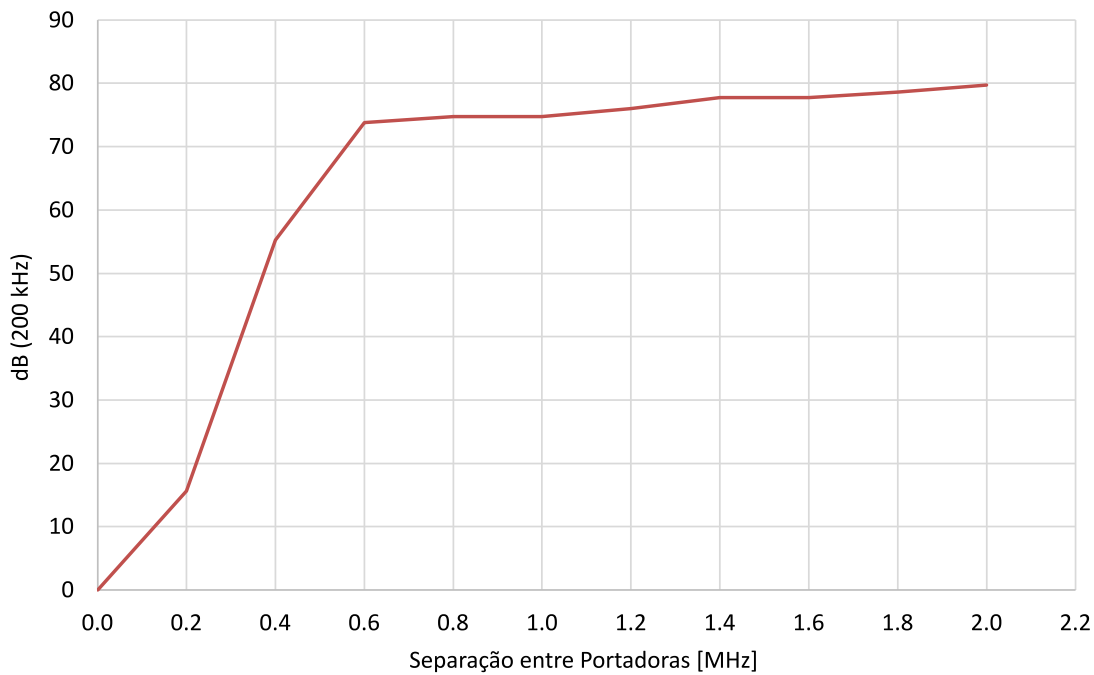


Figura 3.5: ACLR da Estação Base GSM-R sobre o GSM-R.

Uma vez calculado o ACLR é necessário calcular o OBE, assumindo o pior caso, ou seja, para potência de emissão máximas, utilizando a equação 3.7. É representado na Figura 3.6 o OBE para uma estação base GSM-R, na sua própria banda.

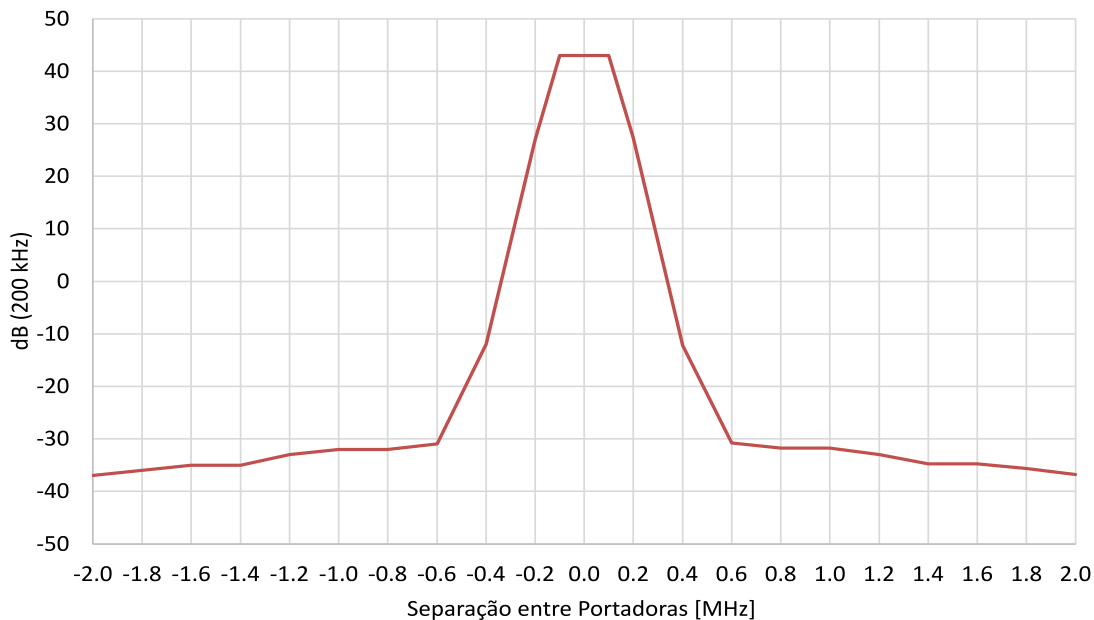


Figura 3.6: Níveis de emissão fora-de-banda de uma estação base GSM-R, na banda do GSM-R (200 kHz).

3.2.2 UMTS

O ACLR da estação base e do terminal móvel, na faixa de 900 MHz, sobre o GSM-R foi obtido a partir da máscara espectral definida nas Tabelas 2.7 e 2.8 respectivamente, através da integração dos níveis de sinal definidos, sobre uma largura de banda de 200 KHz (largura de banda do GSM-R). De modo a clarificar este cálculo, segue na Figura 3.7 um exemplo que ilustra o método utilizado para obter o parâmetro ACLR no caso do UMTS.

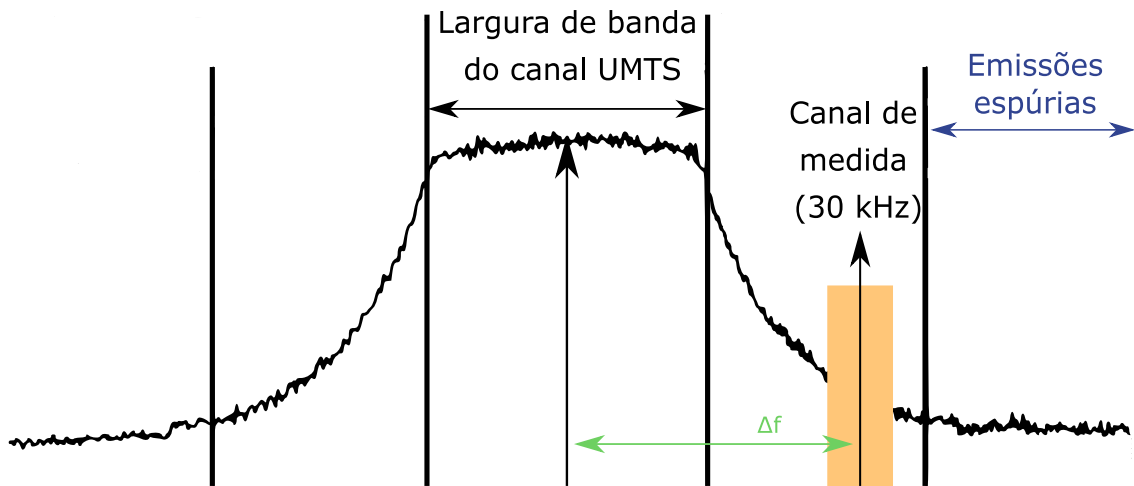


Figura 3.7: Caracterização dos parâmetros para cálculo do ACLR em UMTS.

Analisando a Figura 3.7 é possível identificar que o parâmetro Δf , presente nas Tabelas 2.7 e 2.8, corresponde à separação entre a frequência central do canal UMTS e a frequência central do canal de medida. Posto isto, para calcular a potência associada a cada canal de medida com a variação de Δf , é utilizada a equação 3.5.

$$P_{out\ band}(30\ kHz) = R_M + 10\log_{10}\left(\frac{30\ kHz}{LB_{CHM}}\right) \quad (3.5)$$

onde, $P_{out\ band}(30\ kHz)$ em dBm, corresponde à potência fora-de-banda para 30 kHz, o R_M são os requisitos mínimos das bandas I, II e III (Ver Tabelas 2.7 e 2.8) e LB_{CHM} é a largura de banda do canal de medida (kHz).

Uma vez calculado o parâmetro $P_{out\ band}(30\ kHz)$ é possível determinar o $ACLR_{200\ kHz}$, através de (3.6), que representa o valor de ACLR sobre a banda GSM-R com uma

largura de banda de 200 kHz.

$$ACLR_{200\text{ kHz}} = P_{in\text{ band}} - \left(P_{out\text{ band}}(30\text{ kHz}) + 10\log\left(\frac{LB_{GSM-R}}{30\text{ kHz}}\right) \right) \quad (3.6)$$

onde, $P_{in\text{ band}}$ diz respeito à potência máxima emitida pela estação base UMTS 900 (dBm) e o LB_{GSM-R} corresponde à largura de banda utilizado pelo GSM-R (200 kHz).

Uma vez apresentadas todas as equações necessárias para o cálculo do ACLR, na Figura 3.8 é apresentado este parâmetro em função do desvio entre portadoras, quando as redes UMTS são implementadas na mesma banda do GSM 900. Os cálculos foram realizados para uma largura de banda do recetor de 200 kHz, a fim de de ser possível estimar as emissões fora-de-banda para um canal GSM-R na banda adjacente.

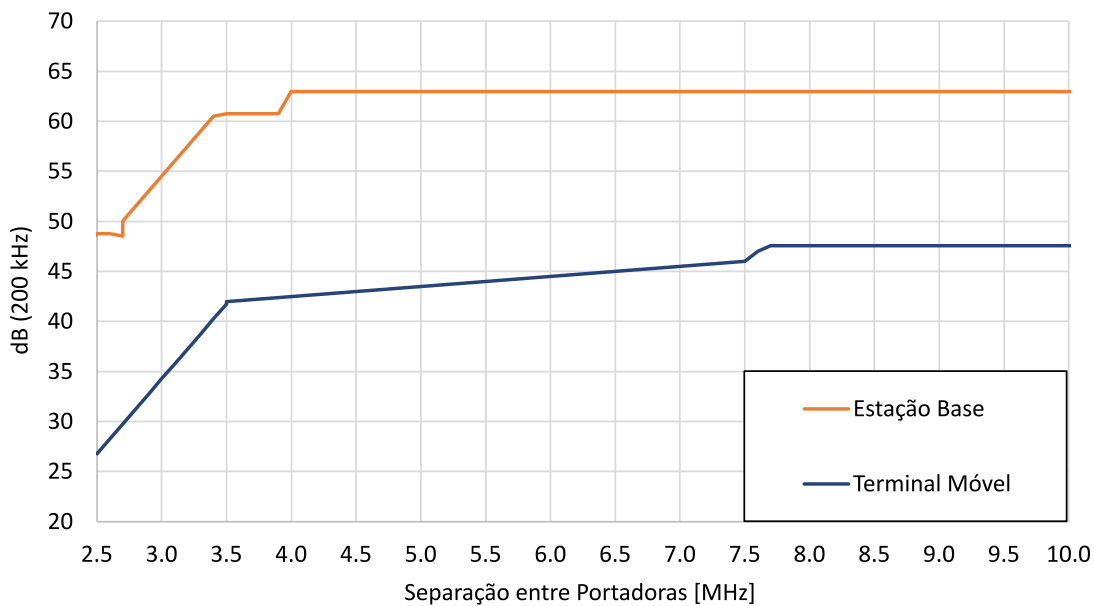


Figura 3.8: ACLR da Estação Base e do terminal móvel UMTS 900 sobre o GSM-R.

Como era espectável, o valor de ACLR é muito maior no caso da estação base, uma vez que a sua potência de emissão é superior ao de um terminal móvel. É de salientar que, no caso da estação base, no espaçamento de 2.8 MHz, o valor de ACLR é de 50 dB e aos 4.8 MHz é de 63 dB. No caso do terminal móvel, no espaçamento de 2.8 MHz, o valor é de 31.3 dB e aos 4.8 MHz de 43.3 dB, tal como consta no relatório ECC 82 [4].

Assim sendo, uma vez calculado o ACLR, é possível determinar o *OBE*, ou seja, o sinal emitido, numa ou mais, frequências, imediatamente fora da largura de

banda atribuída ao canal de emissão, resultante no processo de modulação. É de salientar que as emissões fora-de-banda não podem ser reduzidas sem afetar a correspondente transmissão de informação. Assim sendo, temos que:

$$OBE = P_{tx} - ACLR_{200\text{ kHz}} \quad (3.7)$$

onde, P_{tx} equivale à potência de emissão (dBm) e o $ACLR_{200\text{ kHz}}$ é dado por (3.6).

Na Figura 3.9, são apresentados os níveis de potência emitida fora-de-banda para a estação base e para o terminal móvel. No caso da estação base, quando a carga da célula está no máximo, a 75%, a 50% e no mínimo da sua capacidade, já com a aplicação do ACLR determinado anteriormente. A potência de emissão para a estação base é fixada nos 43 dBm e a do terminal móvel nos 21 dBm.

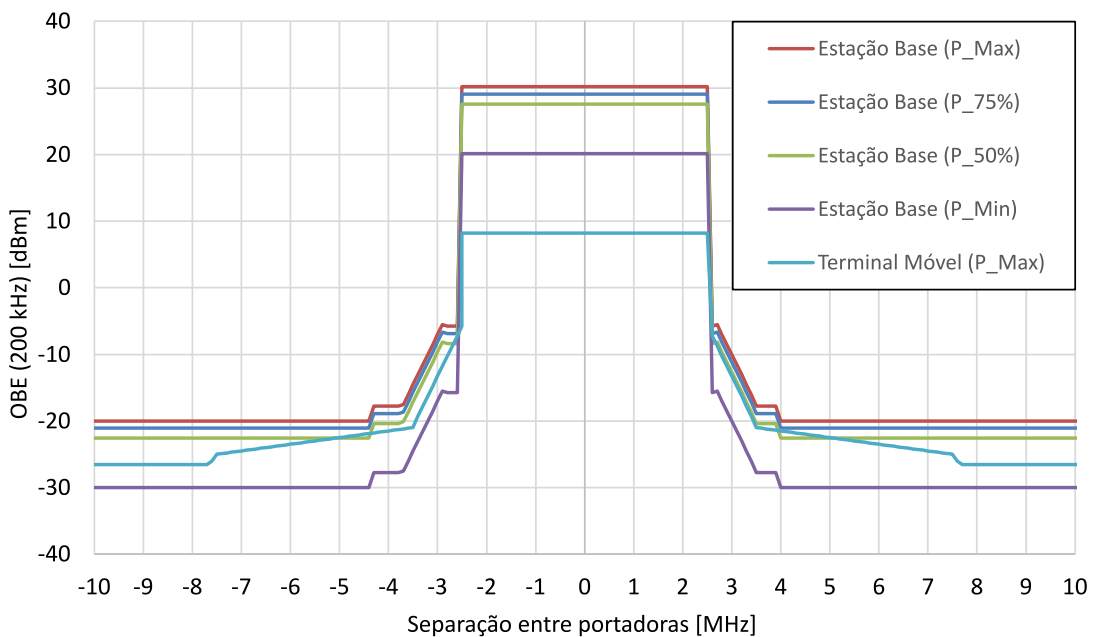


Figura 3.9: Níveis de emissão fora-de-banda da estação base e do terminal móvel UMTS 900, na banda do GSM-R (200 kHz).

Analisando a Figura 3.9, podemos verificar que a potência fora-de-banda decresce com o aumento da separação entre bandas, como era expectável. Note-se ainda que, para o caso da estação base, para um espaçamento entre portadoras superior a 4 MHz, a máscara entra no domínio das emissões espúrias, enquanto que para o caso do terminal móvel apenas entra neste domínio quando a separação é superior a 7.7 MHz. Ainda é possível comparar o OBE entre a estação base e o terminal móvel, sendo que, quando a estação base está a emitir na sua

potência máxima, o OBE é sempre superior face ao do terminal móvel, situação que é invertida no caso da estação base estar a emitir na sua potência mínima.

3.2.3 LTE

Uma vez caracterizado o ACLR, tanto da estação base como do terminal móvel UMTS, é necessário realizar o mesmo procedimento, mas desta vez para LTE, na faixa de 900 MHz.

O ACLR da estação base e do terminal móvel sobre o GSM-R foi obtido a partir da máscara espectral definida nas Tabelas 2.10, 2.11 e 2.12 através da integração dos níveis de sinal definidos, sobre uma largura de banda de 200 KHz. Tal como foi demonstrado anteriormente para o UMTS, uma vez mais para clarificar este cálculo, segue na Figura 3.10 um exemplo que ilustra o método utilizado para obter o parâmetro ACLR no caso do LTE.

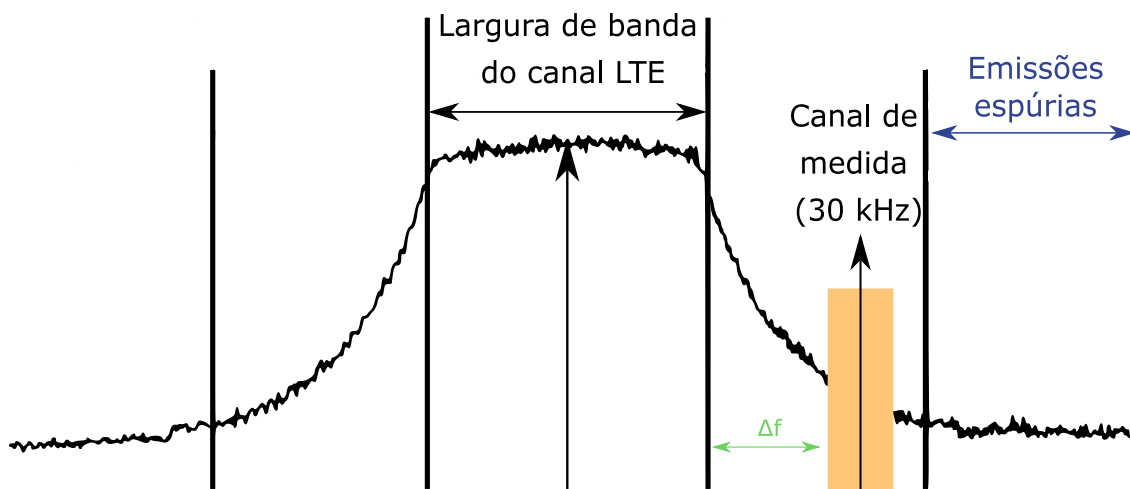


Figura 3.10: Caracterização dos parâmetros para cálculo do ACLR em LTE.

Analisando a Figura 3.10 é possível identificar que o parâmetro Δf , presente nas Tabelas 2.10, 2.11 e 2.12, corresponde à separação entre o limite do canal LTE e o limite do canal de medida. Posto isto, para calcular a potência associada a cada canal de medida com a variação de Δf é utilizado o mesmo método utilizado anteriormente para o UMTS.

Nas Figuras 3.11 e 3.12 é apresentado este parâmetro, no caso da estação base e do terminal móvel, respetivamente, quando as redes LTE são implementadas na mesma banda do GSM 900. Os cálculos foram realizados para uma largura de

banda do receptor de 200 kHz, a fim de ser possível estimar as emissões fora-de-banda para um canal recetor GSM-R adjacente.

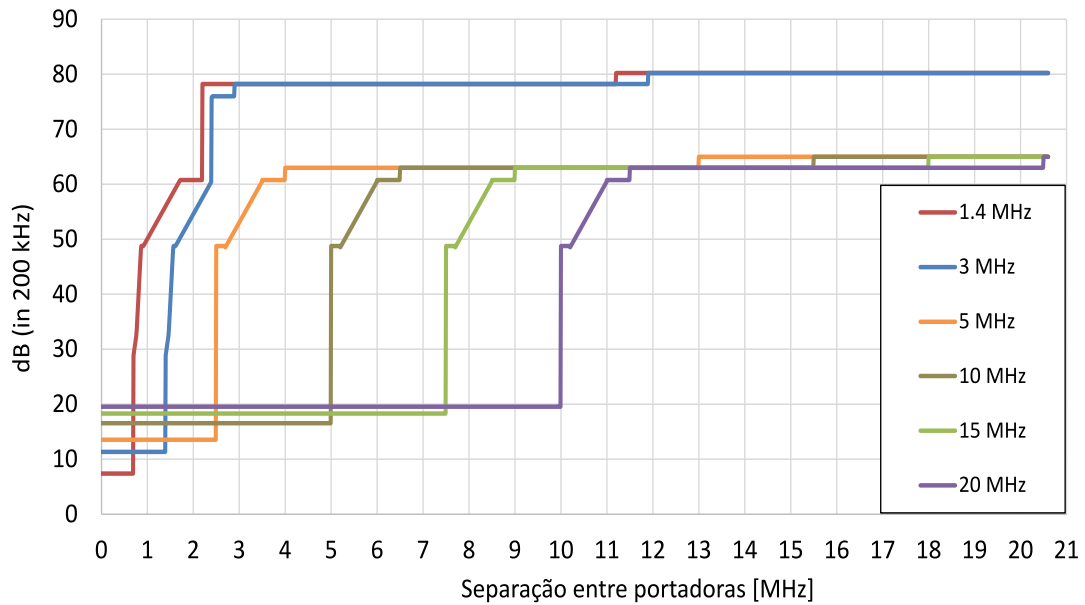


Figura 3.11: ACLR da Estação Base LTE 900 sobre o GSM-R.

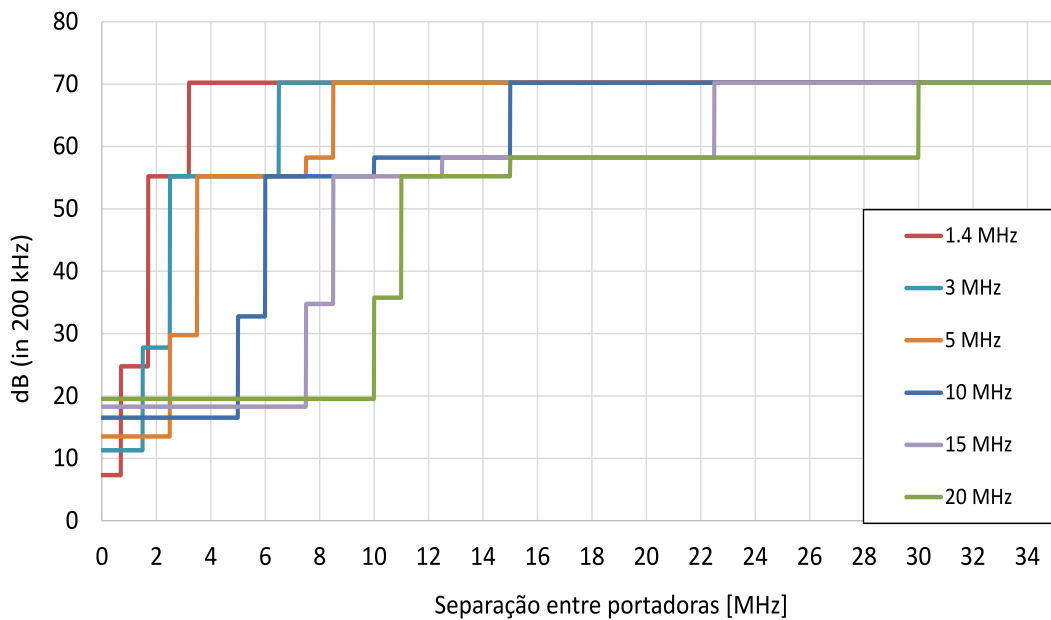


Figura 3.12: ACLR do terminal móvel LTE 900 sobre o GSM-R.

Através das Figuras 3.11 e 3.12 podemos observar que tal como era espectável, um vez mais, o valor de ACLR é maior no caso da estação base, uma vez que a sua potência de emissão é superior face à de um terminal móvel. Ainda é possível

verificar o ACLR para todas as configurações de largura de banda disponíveis nas redes LTE.

Uma vez caracterizado o ACLR, tanto da estação base como do terminal móvel, é possível determinar os níveis de potência emitida fora-de-banda. Na Figura 3.13 são apresentados estes níveis para o caso da estação base, qualquer que seja a sua configuração, em termos de largura de banda. A potência de transmissão para a estação base é fixada nos 43 dBm.

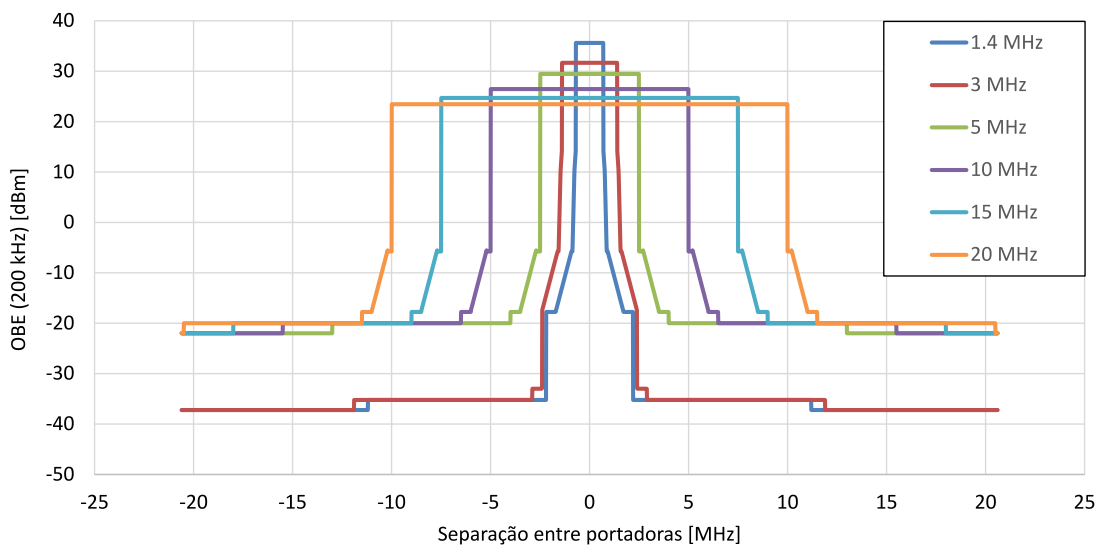


Figura 3.13: Níveis de emissão fora-de-banda de uma estação base LTE 900 na banda do GSM-R (200 kHz).

Ao analisar a Figura 3.13, é possível observar que o impacto que a estação base tem, depende diretamente da largura de banda utilizada, sendo necessário ter em atenção a utilização de larguras de banda maiores, pois deste modo, a portadora atribuída terá de ter em conta a banda de guarda para as redes GSM-R. Estas emissões fora-de-banda serão ainda mais influenciadas, quando as subportadoras LTE se encontrarem nos limites do canal atribuído.

Na Figura 3.14, é apresentado o mesmo parâmetro representado na Figura anterior, mas desta vez para o terminal móvel, para todas as configurações de largura de banda possíveis. A potência de transmissão para o terminal móvel é fixada nos 23 dBm.

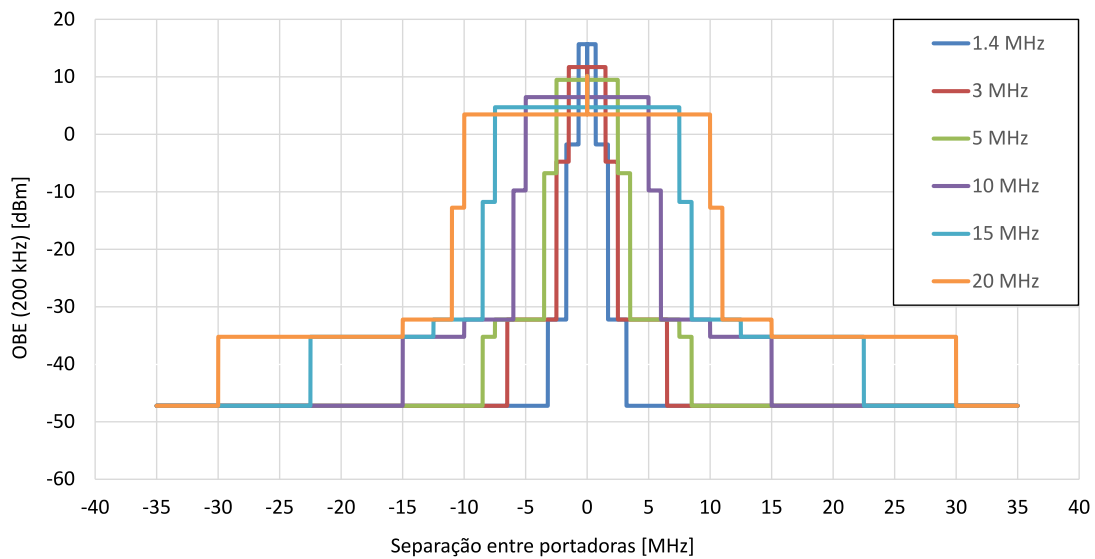


Figura 3.14: Níveis de emissão fora-de-banda de um terminal móvel LTE 900 na banda do GSM-R (200 kHz).

Analisando a Figura 3.14, chega-se à mesma conclusão que para o caso da estação base e, como era expectável, as emissões neste caso causarão menos impacto nas redes GSM-R em comparação com as emissões provenientes de uma estação base.

3.2.4 5G - NR

Por fim e uma vez mais, é necessário o mesmo procedimento realizado anteriormente, mas desta vez para o 5G. O ACLR da estação base e do terminal móvel sobre o GSM-R foi obtido a partir da máscara espectral definida nas Tabelas 2.13 e 2.14. Tal como foi demonstrado anteriormente para o LTE, o método utilizado para o cálculo do ACLR para o 5G NR é o mesmo, como se pode ver na Figura 3.10.

Nas Figuras 3.15 e 3.12 é apresentado este parâmetro, no caso da estação base e do terminal móvel, respetivamente, quando as redes 5G são implementadas na mesma banda do GSM 900. Os cálculos foram realizados para uma largura de banda do receptor de 200 kHz, a fim de ser possível estimar as emissões fora-de-banda para um canal recetor GSM-R adjacente.

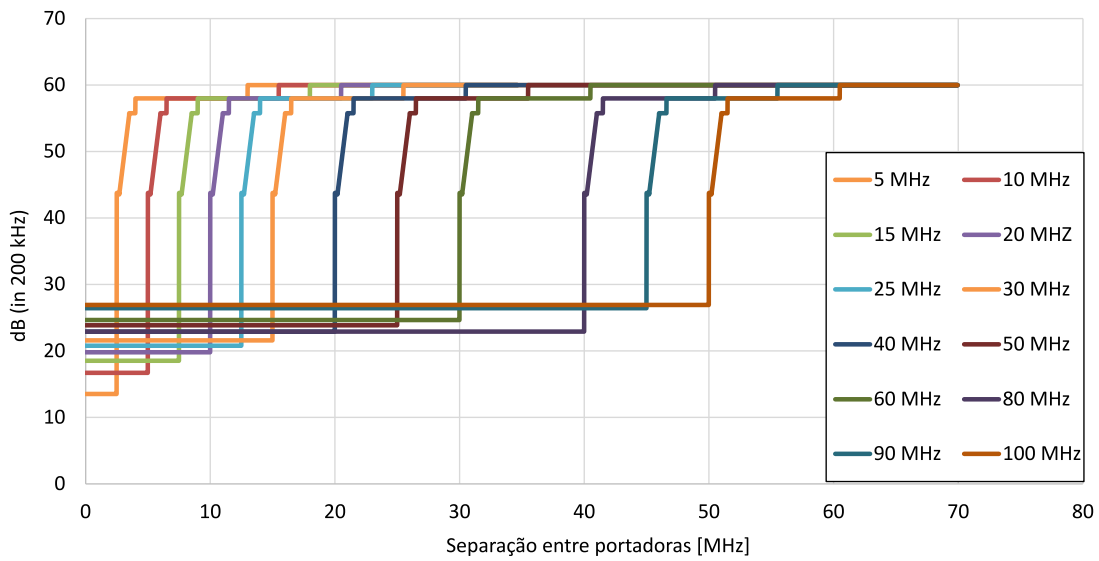


Figura 3.15: ACLR da Estação Base 5G sobre o GSM-R.

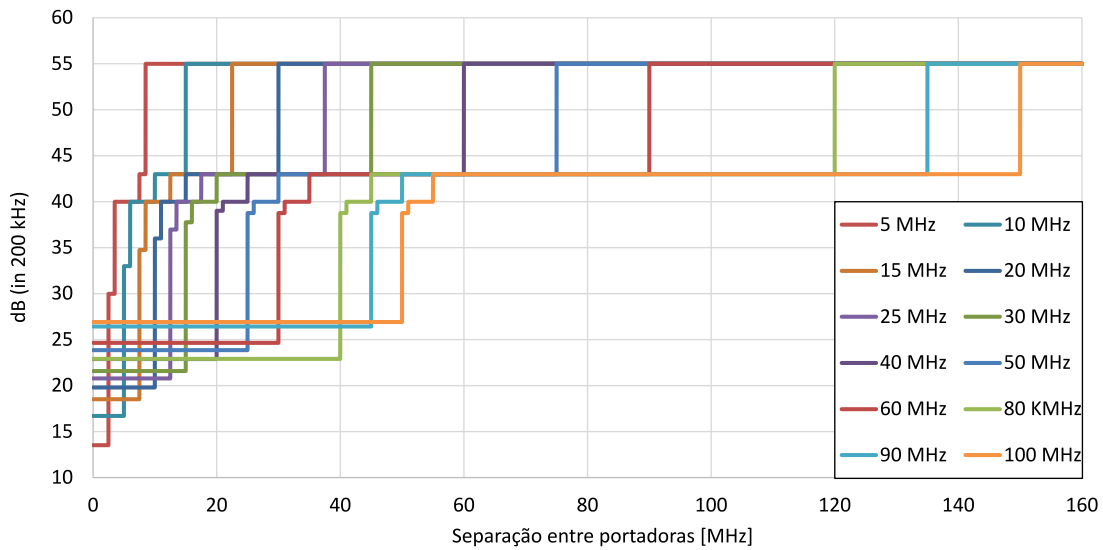


Figura 3.16: ACLR do Terminal Móvel 5G sobre o GSM-R.

Ao observar as Figuras 3.15 e 3.16 verifica-se novamente, que o valor de ACLR é maior no caso da estação base face ao de um terminal móvel. Ainda é possível verificar o ACLR para todas as configurações de largura de banda disponíveis nas redes 5G.

Uma vez caracterizado o ACLR, tanto da estação base como do terminal móvel, é possível determinar os níveis de potência emitida fora-de-banda. Na Figura 3.17 são apresentados estes níveis para o caso da estação base, qualquer que seja a sua

configuração, em termos de largura de banda. A potência de transmissão para a estação base é fixada nos 38 dBm.

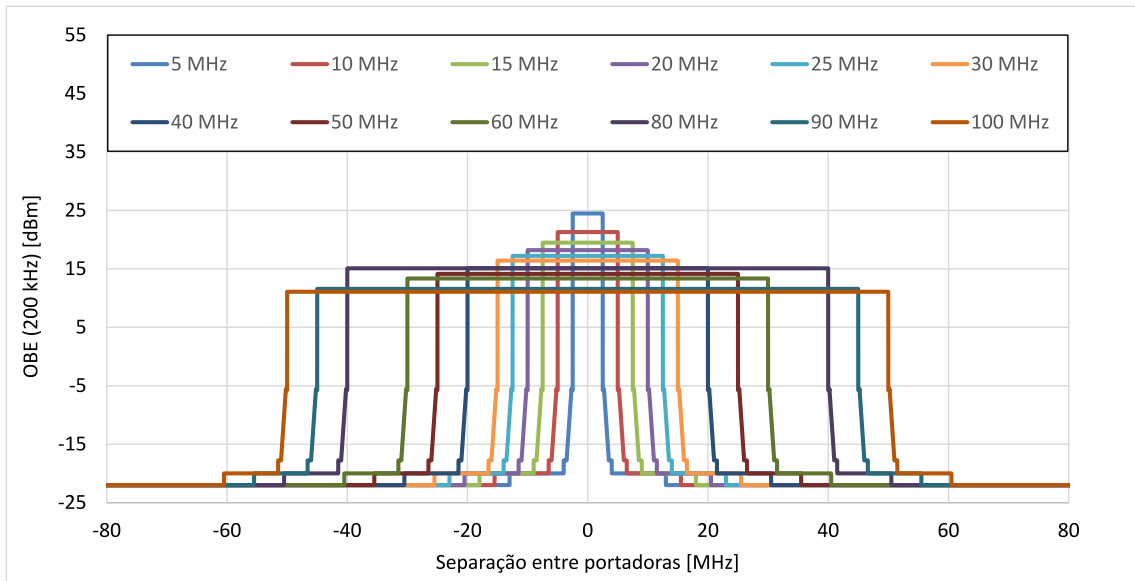


Figura 3.17: Níveis de emissão fora-de-banda de uma estação base 5G na banda do GSM-R (200 kHz).

Ao analisar a Figura 3.17, as conclusões retiradas são iguais às do LTE, ou seja, é possível observar que o impacto que a estação base tem, depende diretamente da largura de banda utilizada, sendo necessário ter em atenção a utilização de larguras de banda mais elevadas, pois deste modo, a portadora atribuída terá de ter em conta a banda de guarda para as redes GSM-R.

Na Figura 3.18, é apresentado o mesmo parâmetro representado na Figura anterior, mas desta vez para o terminal móvel, para todas as configurações de largura de banda possíveis. A potência de emissão para o terminal móvel é fixada nos 23 dBm.

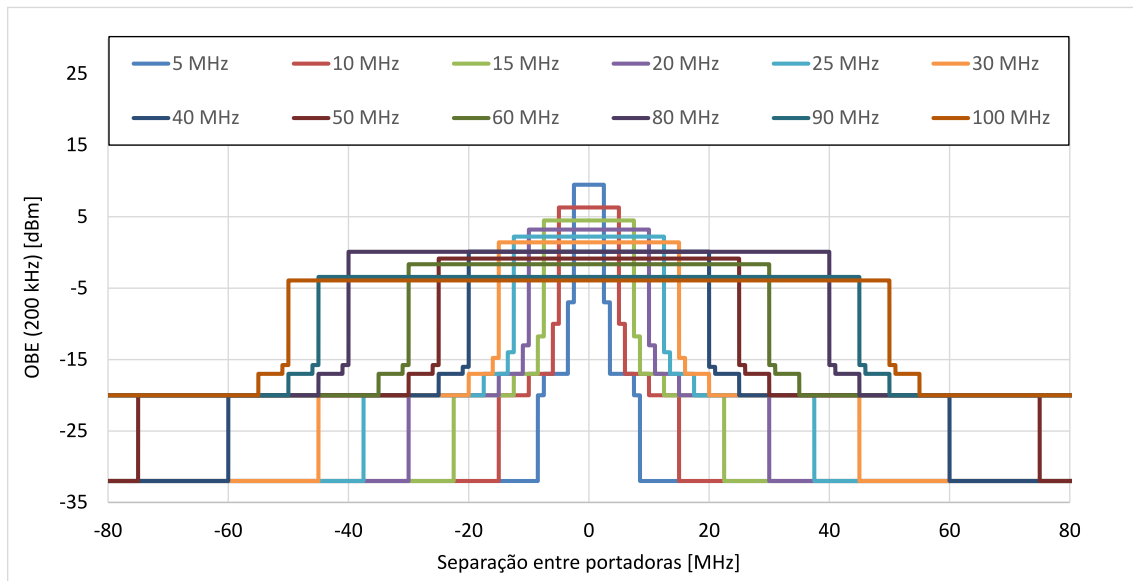


Figura 3.18: Níveis de emissão fora-de-banda de um terminal móvel 5G na banda do GSM-R (200 kHz).

Analisando a Figura 3.18, chega-se à mesma conclusão que para o caso da estação base, ou seja, as emissões neste caso causarão menos impacto nas redes GSM-R em comparação com as emissões provenientes de uma estação base, tal como acontecia nas redes referidas anteriormente.

3.2.5 Análise global

Uma vez realizado o estudo para o UMTS, LTE e 5G, é possível fazer uma comparação para avaliar qual é a tecnologia que poderá provocar mais problemas a nível de interferência nas redes GSM-R. Na Figura 3.19 é apresentada a projeção da potência emitida sobre a banda dos 200 kHz do GSM-R, admitindo que a estação base da respetiva tecnologia esta a emitir na sua potência máxima (pior caso). Na Figura estão representadas as 19 portadoras GSM-R, de forma a facilitar a observação das emissões fora-de-banda e o respetivo impacto no GSM-R [22]. De modo a ser possível efetuar uma melhor comparação entre as 3 tecnologias, foi utilizada uma largura de banda de 5 MHz e uma portadora colocada nos 927.6 MHz. Na escolha da portadora foi tido em conta a portadora mais próxima da banda GSM-R comum às 3 tecnologias.

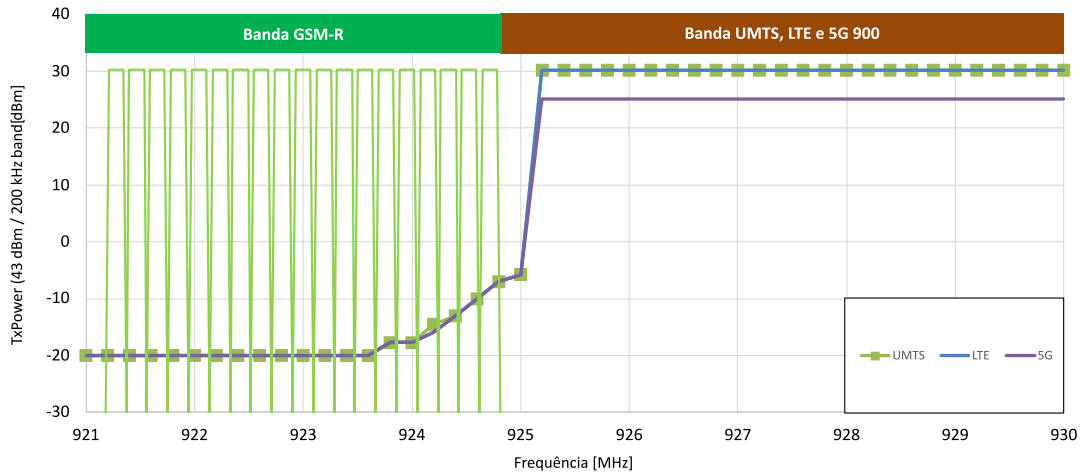


Figura 3.19: Comparação entre as emissão fora-de-banda de uma estação base UMTS, LTE e 5G 900, sobre uma banda de 200 kHz.

Ao analisar a Figura 3.19 verifica-se que as 4 portadoras superiores do GSM-R são substancialmente mais afetadas pelas emissões das primeiras portadoras das tecnologias em causa, não sendo no entanto de excluir o possível impacto nas portadoras inferiores. Apenas será possível quantificar efetivamente a perturbação sentida após a determinação da seletividade do terminal GSM-R, que irá ser apresentado no próximo sub capítulo.

3.3 Seletividade

A seletividade de canal adjacente é uma medida que caracteriza a capacidade que um recetor rádio apresenta quando recebe um sinal no canal ou na frequência desejada, na presença de outro sinal numa frequência ou canal adjacente. Assim sendo, a ACS pode ser definida como a capacidade que o filtro presente no recetor tem para suprimir os sinais presentes em canais adjacentes. Na Figura 3.20 é representado um exemplo meramente ilustrativo.

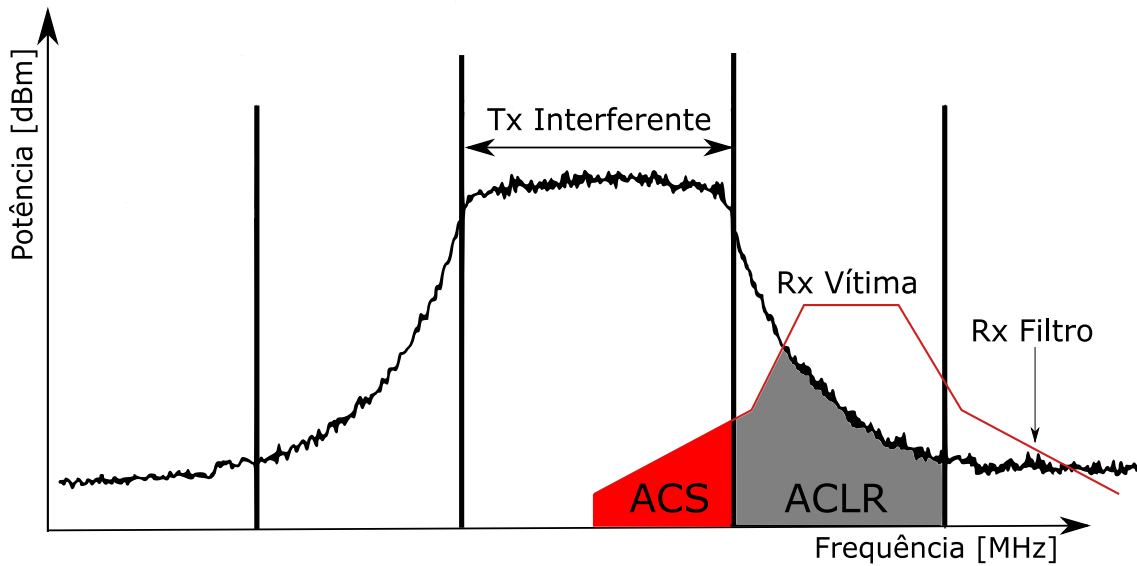


Figura 3.20: Exemplo de ACS.

Visualizando a Figura 3.20, é possível verificar que o transmissor emite além do canal que lhe é atribuído sendo que estas emissões serão recebidas pelo receptor. Vemos também que o filtro presente no receptor é "imperfeito" e, portanto, capta sinais que estão fora da sua própria banda. A seletividade do canal adjacente do receptor determina exatamente quanta interferência é captada. Deste modo, é determinante o efeito prejudicial que as emissões fora-de-banda têm sobre as outras redes.

Em segundo lugar, existe um elemento espacial para a interferência de canais adjacentes. Estamos, naturalmente, a lidar com sistemas de comunicação que abrangem a mesma área geográfica, mas dentro dessa área existem transmissores e receptores de diferentes sistemas em canais adjacentes, podendo encontrar-se numa variedade de posições em relação uns aos outros. À medida que a potência se dissipa com a distância do transmissor, a potencial interferência existente causada por um dispositivo a partir de outro também diminui. Por outras palavras, a distância entre o emissor e o receptor terá impacto sobre as emissões fora-de-banda do canal adjacente sentidas pelo receptor, na Figura referida anteriormente. Assim sendo, as distâncias entre os interferentes (transmissores) e as vítimas (receptores) são um importante fator a ter em consideração no cálculo do impacto da interferência.

De uma forma geral, a ACS do receptor GSM-R não é diretamente fornecida pelas especificações técnicas. No entanto, a partir dos valores de nível de bloqueio, e tendo em conta a sensibilidade presente nas especificações e respetivos patamares

de ruído, é possível estimar o valor da seletividade, como se pode visualizar na Tabela 2.4.

A seletividade para os três canais adjacentes à portadora poderá ser estimada diretamente pela relação C/I definida na Tabela 2.5. Assim, para estes casos, a ACS é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Níveis de ACS para as três primeiras portadoras adjacentes.

| Canal | Afastamento da portadora [kHz] | ACS [dB] |
|--------------------|--------------------------------|----------|
| Co-canal | 0 | 0 |
| 1º Canal adjacente | 200 | 18 |
| 2º Canal adjacente | 400 | 50 |
| 3º Canal adjacente | 600 | 58 |

Nos seguintes casos, o valor de ACS é obtido através dos valores de bloqueio, definidos na Tabela 2.4. Para o cálculo, consideram-se os parâmetros como a figura de ruído, sensibilidade e atenuação de cabos, apresentados na Tabela 2.2.

De modo a calcular a ACS, primeiro é necessário calcular a interferência permitida (γ) determinada através de (3.8) [3]).

$$\gamma = [K.LB_{GSM-R}.T + (N_F + C_l)] + 10\log_{10}(10^{\frac{M}{10}} - 1) \quad (3.8)$$

onde, K é a constante de Boltzmann, dada por $1.381 \times 10^{-23} J/K$, T é a temperatura do recetor (Kelvin), N_F é a figura de ruído (dB), C_l corresponde à atenuação dos cabos (dB) e por fim, o M reflete a degradação na sensibilidade devido à presença de interferência (nível de sinal recebido - sensibilidade) (dB).

Assim sendo, uma vez calculado o γ , é possível calcular o ACS, (3.9).

$$ACS = P_{int-T} - \gamma \quad (3.9)$$

onde, P_{int-T} corresponde ao nível de interferência presente à entrada do recetor, na condição de teste, ou seja, representa o nível de bloqueio (dBm), ver Tabela 2.4.

Na Figura 3.21, é apresentado o resultado de ACS para o terminal móvel e estação base GSM-R.

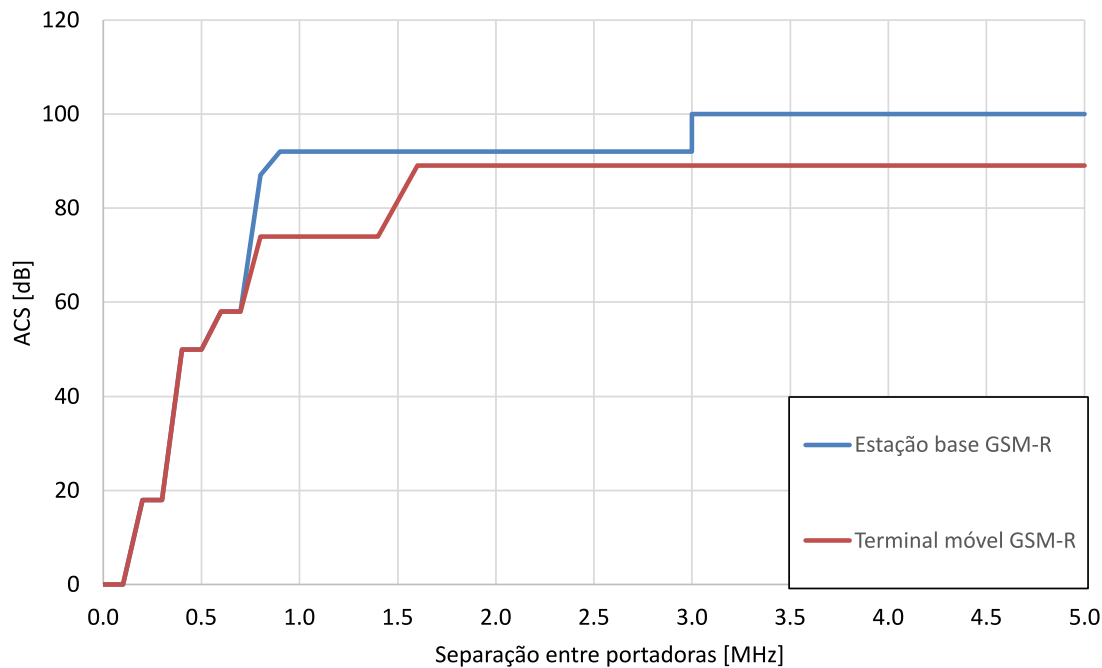


Figura 3.21: ACS da estação base e do terminal móvel em GSM-R.

É possível validar os valores presentes na Tabela 3.1 ao analisar a Figura 3.21, assim como demonstrar os valores de ACS para afastamentos da portadora superiores a 600 kHz.

3.4 Rejeição de Interferência

A rejeição de interferência canal adjacente é representada pelo parâmetro ACIR. Este é definido como a razão entre a potência transmitida em um canal e a interferência total recebida por um recetor no canal adjacente, devido às imperfeições presentes no transmissor e no recetor. De modo a calcular este parâmetro, equação 3.1, é necessário ter em conta a seletividade dos filtros GSM-R (ACS), apresentada na Figura 3.21, e o ACLR da estação base e do terminal móvel UMTS e LTE 900.

De acordo com o ACS determinado anteriormente, a faixa de frequências com influência no sinal recebido encontra-se entre $-600 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq +600 \text{ kHz}$ em torno da portadora GSM-R. Na Figura 3.22 é apresentado o valor de ACS para o caso da utilização da portadora 924.6 MHz e da emissão fora-de-banda correspondente à estação base UMTS, LTE e 5G 900 a emitir à potência máxima na portadora 927.6 MHz e com uma largura de banda de 5 MHz.

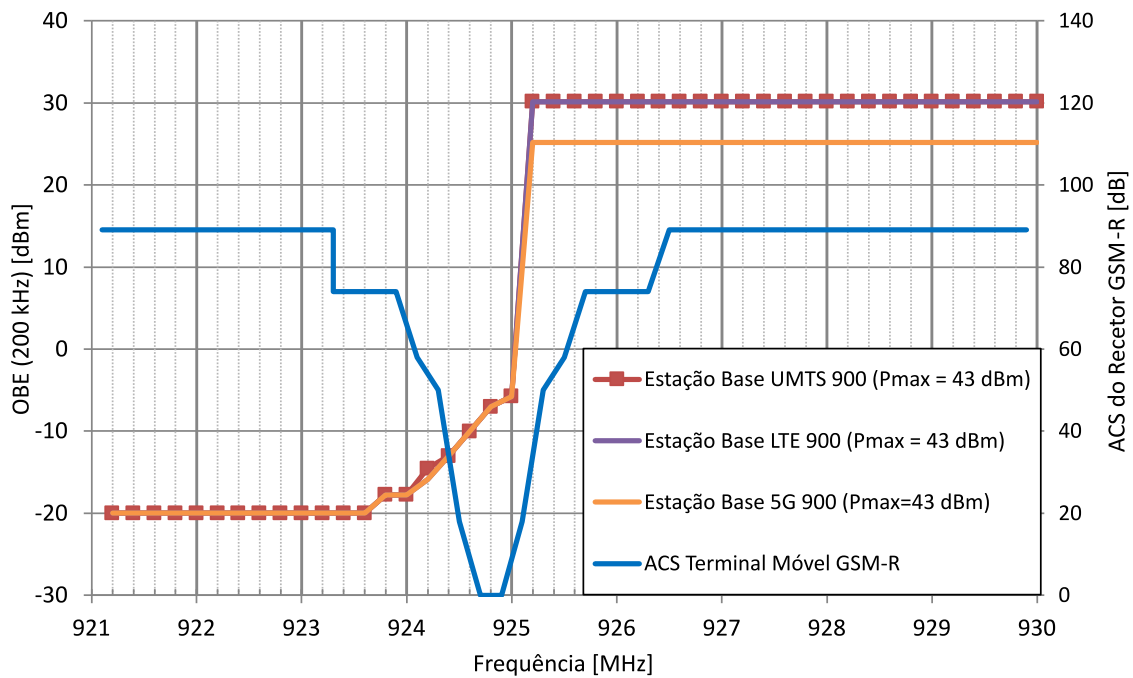


Figura 3.22: ACS do terminal e estação base GSM-R e OBE da estação base UMTS, LTE e 5G 900.

Como é possível verificar na Figura 3.22, a utilização das últimas portadoras GSM-R, ou seja, as mais elevadas, poderá implicar um elevado nível de sinal proveniente das 3 tecnologias em estudo, o que também suscita níveis de interferência maiores.

3.4.1 GSM / GSM-R

Na Figura 3.23 é apresentado o resultado do ACIR de um terminal GSM-R, determinado para o caso da interferência ser proveniente da estação base GSM-R/GSM-R em função da separação entre as respetivas portadoras. O valor de ACIR é obtido através da integração do sinal recebido ao longo da portadora GSM-R e as seis portadoras adjacentes (+/- 600 kHz). Apenas se tem em consideração as 3 portadoras adjacentes, pois o nível de ACS a partir de 600 kHz torna estes valores desprezáveis. Ao valor integrado é retirado o valor de potência emitida, obtendo-se assim o valor da rejeição por parte do terminal.

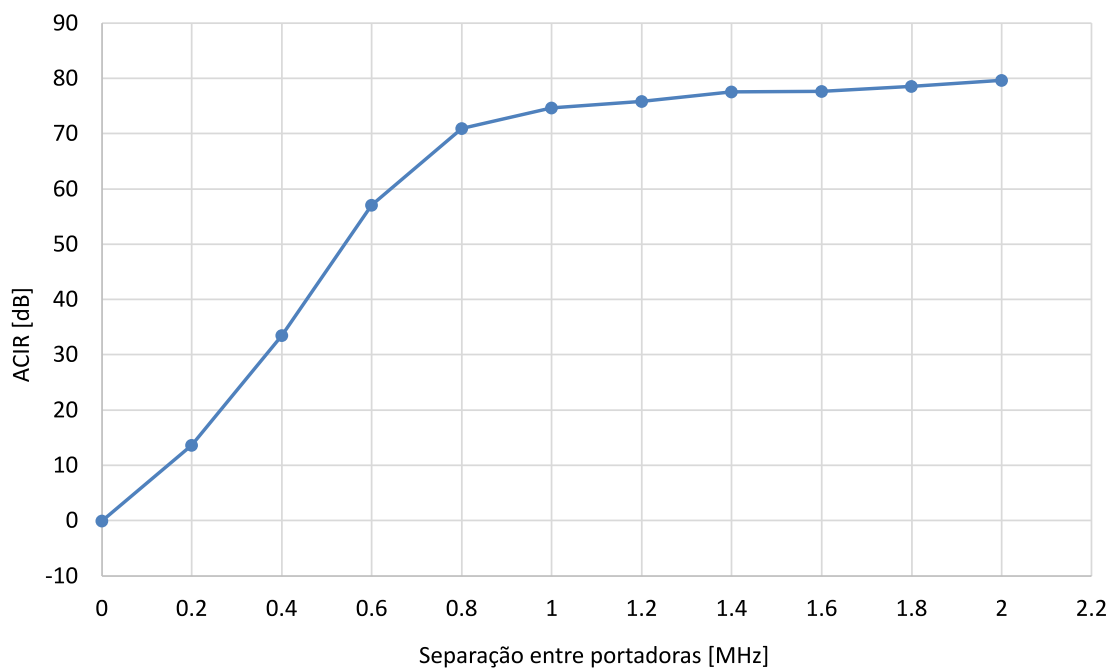


Figura 3.23: ACIR GSM-R relativamente à interferência proveniente do GSM-R.

Na Figura 3.23, apenas é representado o valor de ACIR para o caso do MS (*down-link*), tendo em conta que é a situação estudada neste trabalho.

3.4.2 UMTS

De seguida, é apresentado o ACIR, mas desta vez para o caso do UMTS na banda de 900 MHz, tendo em conta as mesmas condições referidas anteriormente para o caso do GSM-R. Na Figura 3.24 é apresentado este parâmetro no caso do terminal móvel e da estação base.

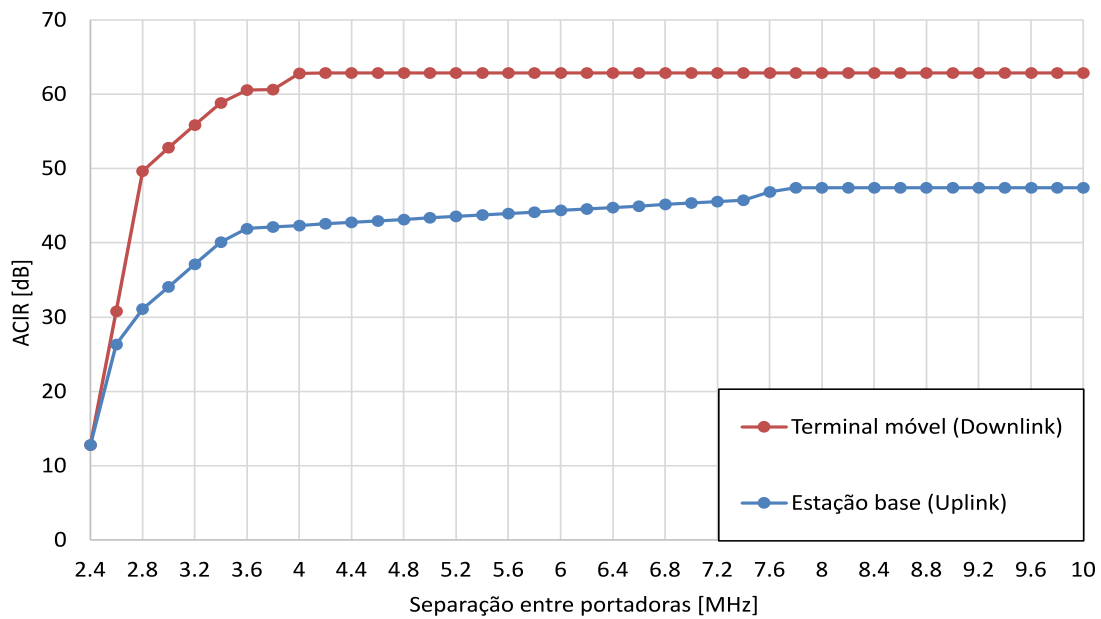


Figura 3.24: ACIR GSM-R relativamente à interferência proveniente do UMTS 900.

Se compararmos o valor resultante com os valores de ACS e ACLR determinados anteriormente, verifica-se que o ACLR é, de facto, o parâmetro que mais influencia o resultado do ACIR. Ainda é possível observar que os terminais móveis são os mais afetados pela interferência causada por redes UMTS 900 face às estações base.

3.4.3 LTE

Nas Figuras 3.25 e 3.26 é apresentado este parâmetro no caso do terminal móvel e da estação base, respetivamente, mas desta vez para o caso do LTE na banda de 900 MHz e para todas as configurações disponíveis.

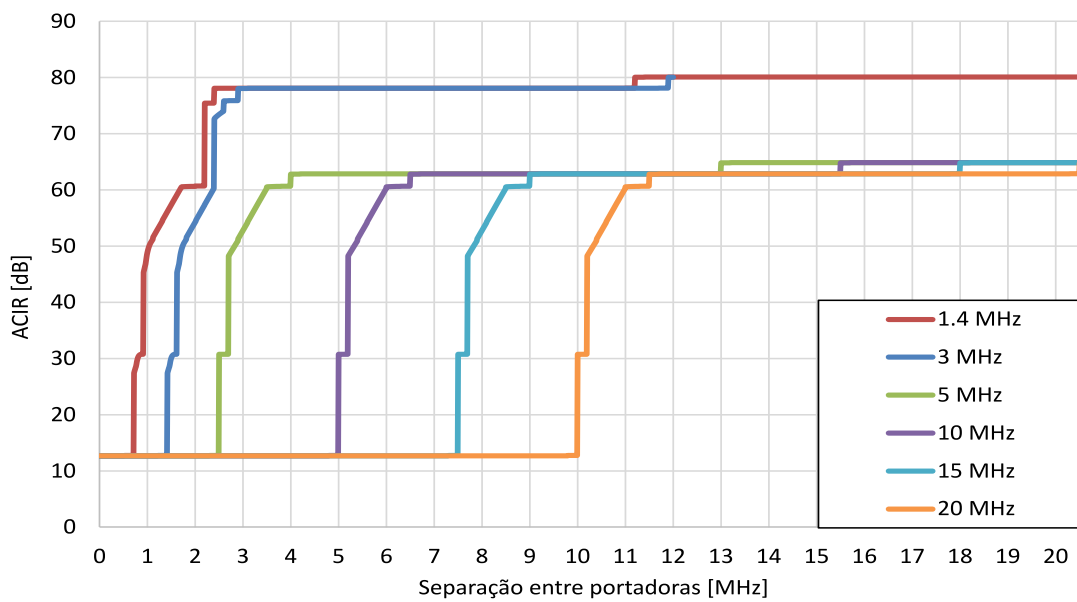


Figura 3.25: ACIR do terminal móvel GSM-R relativamente à interferência proveniente do LTE 900.

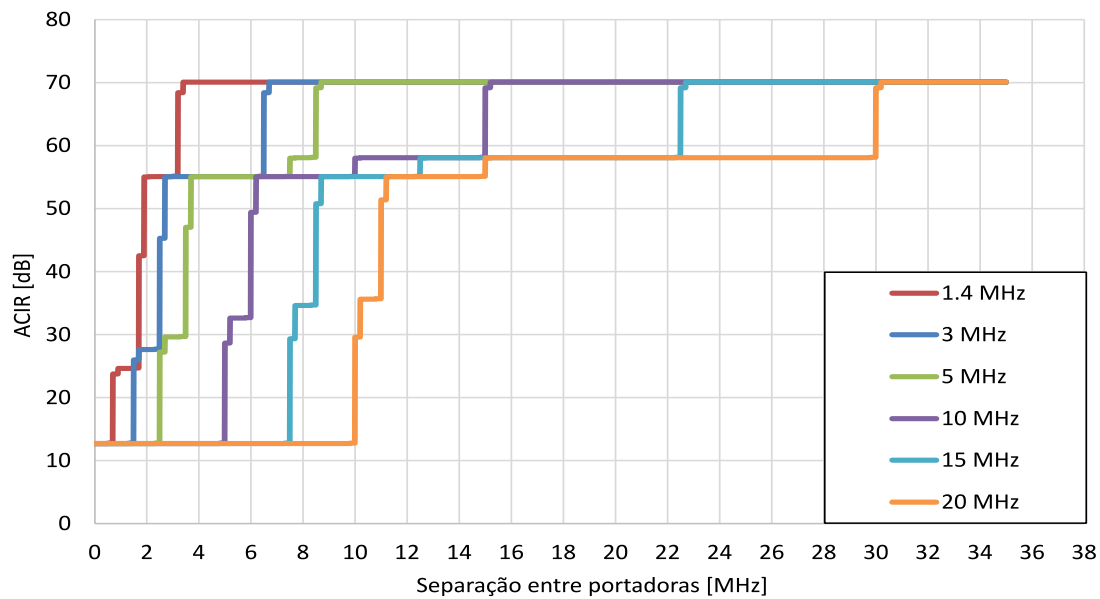


Figura 3.26: ACIR da estação base GSM-R relativamente à interferência proveniente do LTE 900.

Uma vez mais, pela análise das Figuras 3.25 e 3.26, é possível demonstrar que, tal como no caso anterior (ACIR GSM-R relativamente à interferência proveniente do UMTS 900), o terminal móvel é o mais afetado pelas redes adjacentes (UMTS e LTE 900).

3.4.4 5G - NR

Por fim, é apresentado o ACIR, mas desta vez para o caso do 5G NR na banda de 900 MHz, tendo em conta as mesmas condições referidas anteriormente. Nas Figuras 3.27 e 3.28 é apresentado este parâmetro no caso do terminal móvel e da estação base, respetivamente.

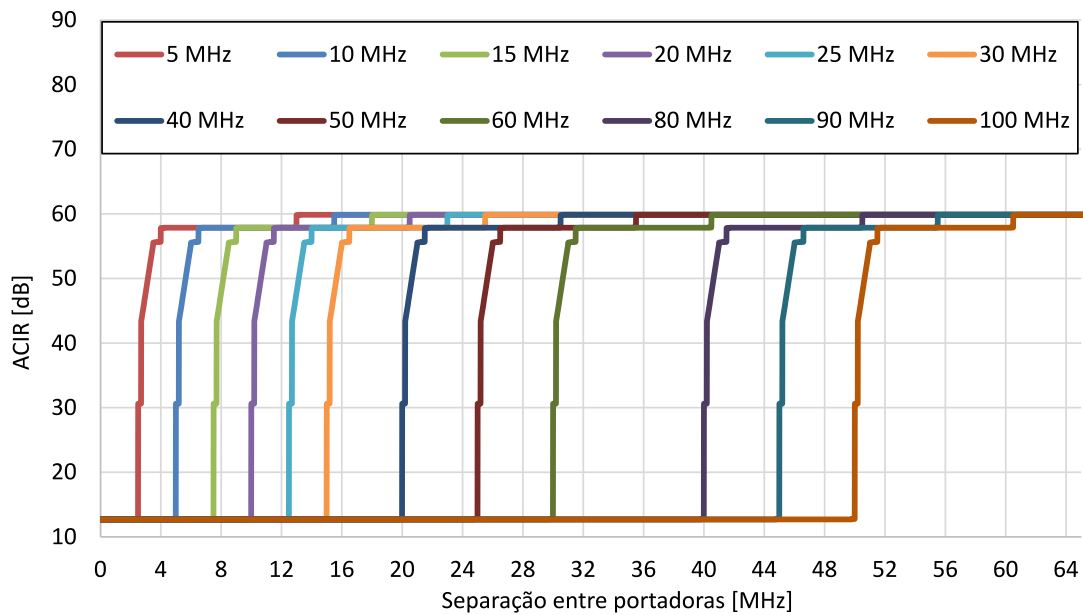


Figura 3.27: ACIR do terminal móvel GSM-R relativamente à interferência proveniente do 5G 900.

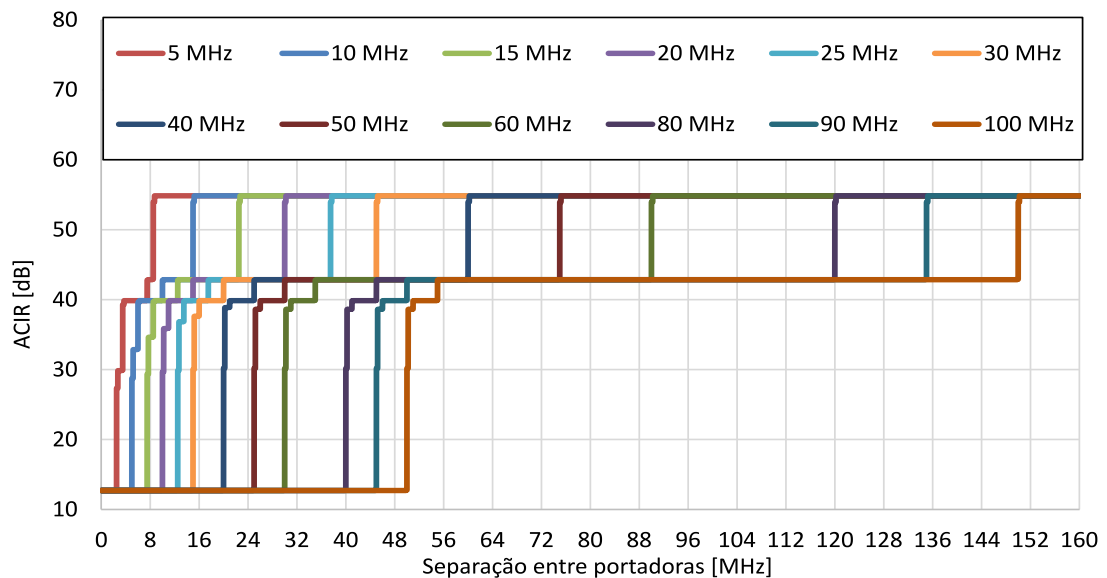


Figura 3.28: ACIR da estação base GSM-R relativamente à interferência proveniente do 5G 900.

3.4.5 Análise Global

Posto isto, na Figura 3.29 segue a comparação entre o UMTS, o LTE e o 5G, sendo que, para facilitar esta comparação, apenas será demonstrado o caso de 5 MHz de largura de banda no caso do LTE e do 5G, de modo a ser comparável com o UMTS.

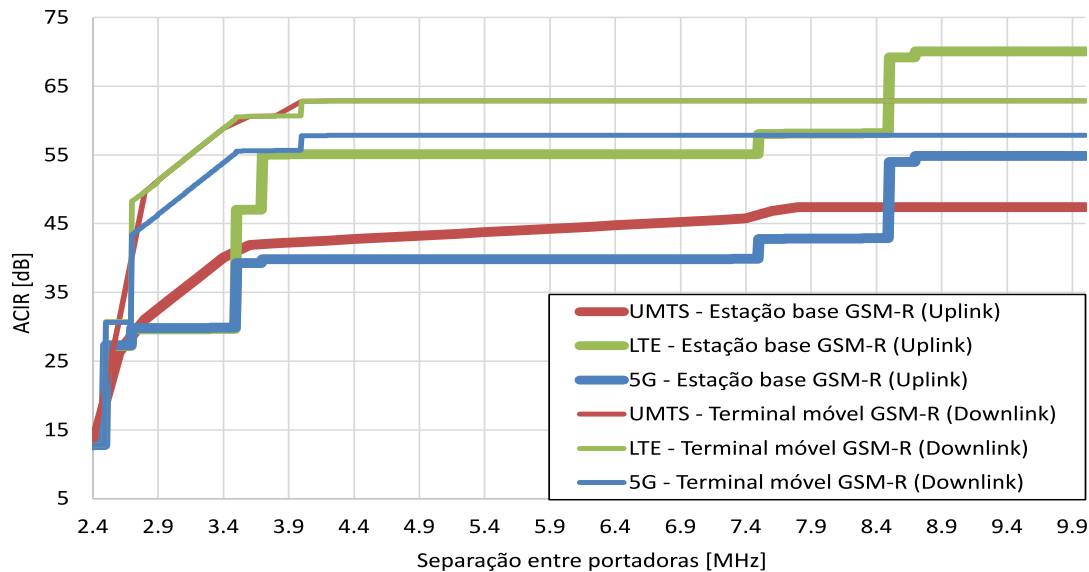


Figura 3.29: Comparação do parâmetro ACIR da estação base GSM-R relativamente à interferência proveniente das redes UMTS, LTE e 5G 900.

A análise da Figura 3.29 permite demonstrar que as redes UMTS e LTE face ao 5G são mais prejudiciais às redes GSM-R em uplink, ou seja, quando o terminal móvel GSM-R é interferido pelas estações base de outras redes. No caso inverso, em que os terminais móveis interferem com as estações base GSM-R, até a uma separação entre portadoras de 3,5 MHz as redes UMTS são mais prejudiciais, mas com o aumento desta separação passam a ser as redes LTE as mais prejudiciais face às outras. Ainda é possível verificar que quando a separação entre portadoras é maior que 8,5 MHz o parâmetro ACIR chega mesmo a ser superior ao caso em downlink. Posto isto, é necessária uma análise rigorosa de modo a perceber efetivamente a separação entre portadoras, dada a importância deste fator, como demonstrado na referida Figura.

Tendo os valores de ACIR para todas as tecnologias, já é possível estimar tanto a interferência intra como a inter *network*, como será explicado no Capítulo 4. Mas antes, ainda é descrito teoricamente, outros dois fenómenos que podem causar interferência por partes das outras redes no GSM-R. Este assunto apenas será

abordado teoricamente, de forma a clarificar os efeitos adversos que as redes dos operadores públicos têm no GSM-R através da análise de outros parâmetros diferentes dos mencionados anteriormente.

3.5 Dessensibilização da estação base e do terminal

Para a determinação da possível dessensibilização do terminal GSM-R, é necessário ter em conta o valor de *Effective Isotropic Radiated Power* (EIRP), (3.10).

$$EIRP = P_{out} - L_c + G_a \quad (3.10)$$

onde, P_{out} potência de saída do emissor em dBm, G_a corresponde ao ganho da antena em dBi e L_c às perdas totais (cabos, conetores, etc) em dB.

Posto isto, é possível obter o valor da emissão fora-de-banda (OBE_{EIRP}) para desvios de frequência entre os 2.5 e os 4.8 MHz da respetiva portadora, descrito em (3.11).

$$OBE_{EIRP} = EIRP - ACIR \quad (3.11)$$

onde, $EIRP$ é dado por (3.10) em dBm, e o $ACIR$ depende da tecnologia e é exposto no Sub-Capítulo 3.4 deste mesmo documento, em dB.

Na Figura 3.30 são apresentados os diferentes níveis, para o UMTS, LTE e 5G NR, no caso da estação base e do terminal móvel. Para efeito dos cálculos posteriores considerar-se-á a situação de carga máxima (pior situação) e utilizar-se-ão as condições para uma largura de banda de 5 MHz, de modo a ser possível efetuar a comparação entre as três redes.

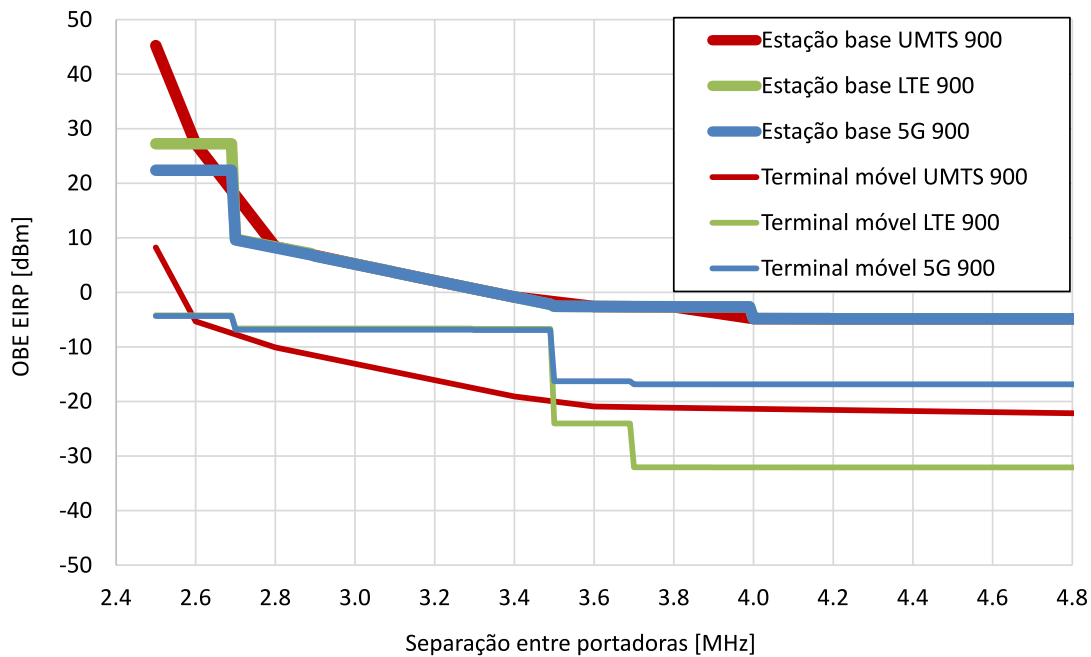


Figura 3.30: Níveis de OBE radiadas pela estação base e terminal móvel UMTS, LTE e 5G 900 em função da separação entre portadoras.

Ao analisar a Figura 3.30, é possível constatar que a ligação mais suscetível a provocar interferência nas redes GSM-R, por parte das redes UMTS, LTE e 5G 900 é em *downlink* (Estação base UMTS/LTE/5G -> Terminal móvel GSM-R). Nesta ligação, as emissões fora-de-banda provenientes das estações base são semelhantes para uma separação entre portadoras superior a 2.8 MHz, mas quando este espaçamento é inferior a 2.8 MHz, a estação base UMTS 900 é quase sempre a mais prejudicial para as portadoras GSM-R adjacentes. No caso da ligação em *uplink* (Terminal móvel UMTS/LTE/5G -> Estação base GSM-R), o terminal móvel UMTS é o mais prejudicial apenas quando o espaçamento entre portadoras é inferior a 2.6 MHz, sendo que para espaçamentos superiores os terminais móveis LTE e 5G partilham do mesmo valor de OBE até aos 3.5 MHz e a partir deste valor passa a ser o terminal móvel 5G o mais prejudicial às redes GSM-R.

Tendo em conta os níveis de OBE e os valores de ACIR apresentados anteriormente, é possível determinar o valor de *Maximum Coupling Loss* (MCL) utilizando o método descrito no *Report 101* [23]. Este valor traduz o isolamento necessário entre o interferente e a vítima, de modo a garantir que não exista interferência.

3.5.1 UMTS

Na Figura 3.31 são apresentadas as curvas que representam o isolamento (MCL) entre o terminal GSM-R e a estação base UMTS na banda de 900 MHz, enquanto que na Figura 3.32, são apresentadas as mesmas curvas, mas agora, entre a estação base GSM-R e o terminal UMTS.

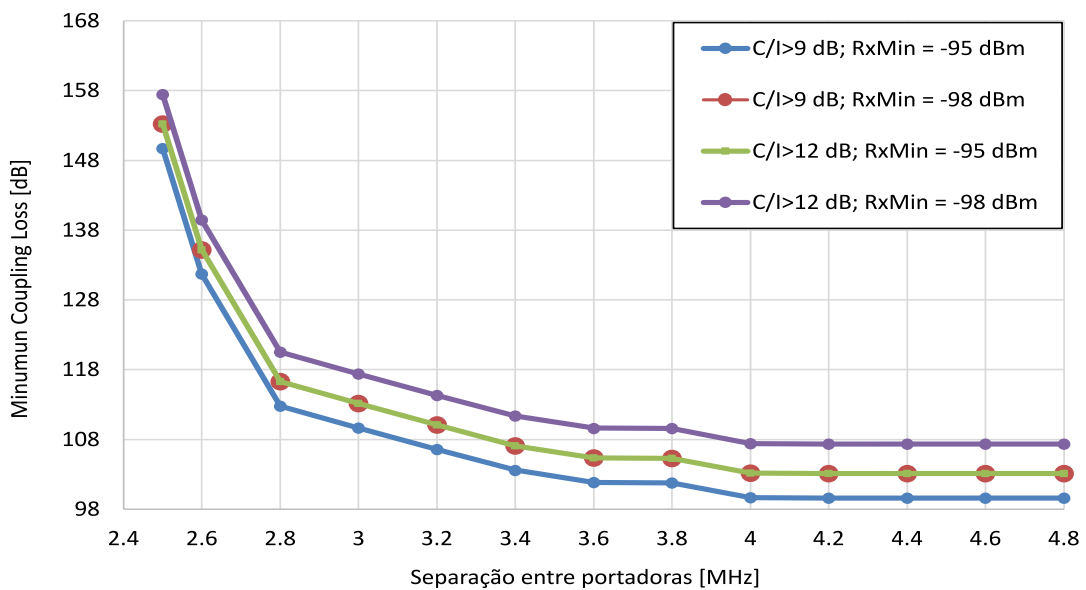


Figura 3.31: MCL entre o terminal móvel GSM-R e a estação base UMTS 900 (*Downlink*).

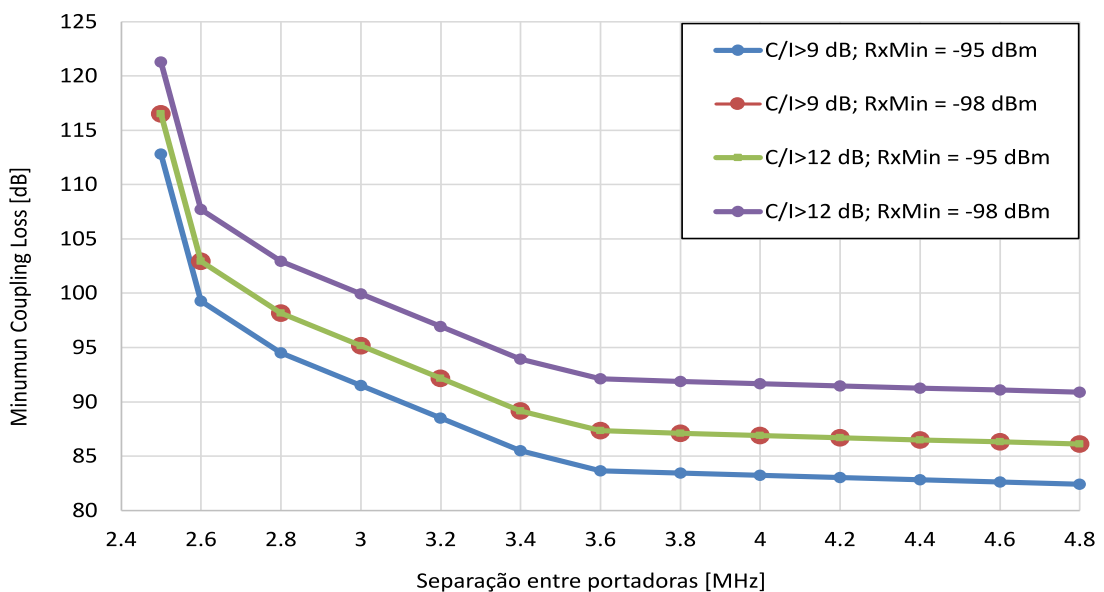


Figura 3.32: MCL entre a estação base GSM-R e o terminal móvel UMTS 900 (*Uplink*).

3.5.2 LTE

Nas Figuras 3.33 e 3.34 são apresentadas as mesmas curvas representadas anteriormente, mas agora para o caso da estação base e do terminal móvel LTE na banda de 900 MHz, respetivamente.

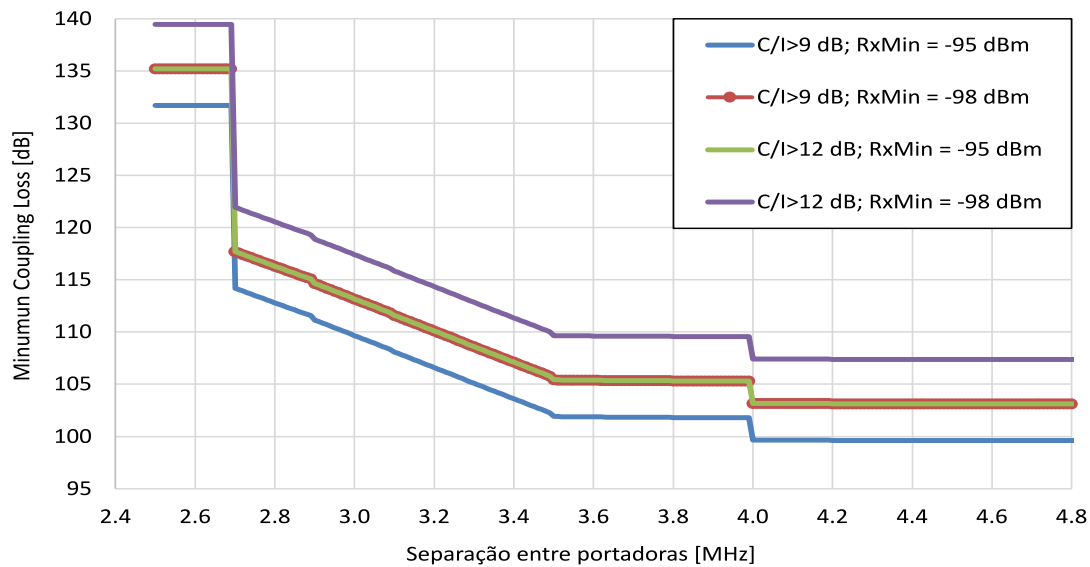


Figura 3.33: MCL entre o terminal móvel GSM-R e a estação base LTE 900 (*Downlink*).

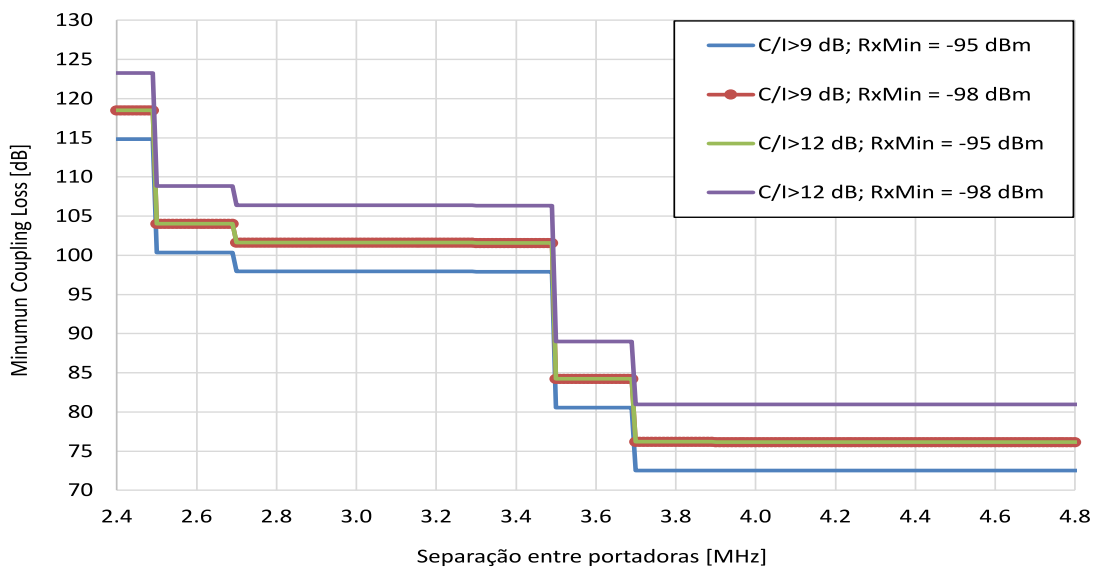


Figura 3.34: MCL entre a estação base GSM-R e o terminal móvel LTE 900 (*Uplink*).

3.5.3 5G - NR

Nas Figuras 3.35 e 3.36 são apresentadas as mesmas curvas representadas anteriormente, mas agora para o caso da estação base e do terminal móvel 5G na banda de 900 MHz, respetivamente.

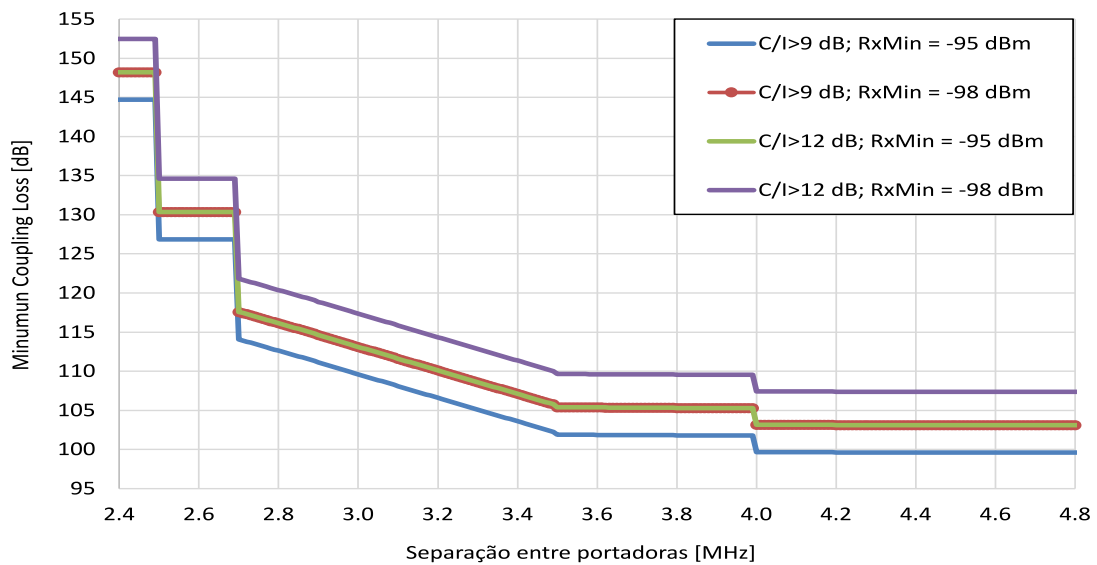


Figura 3.35: MCL entre o terminal móvel GSM-R e a estação base 5G 900 (*Down-link*).

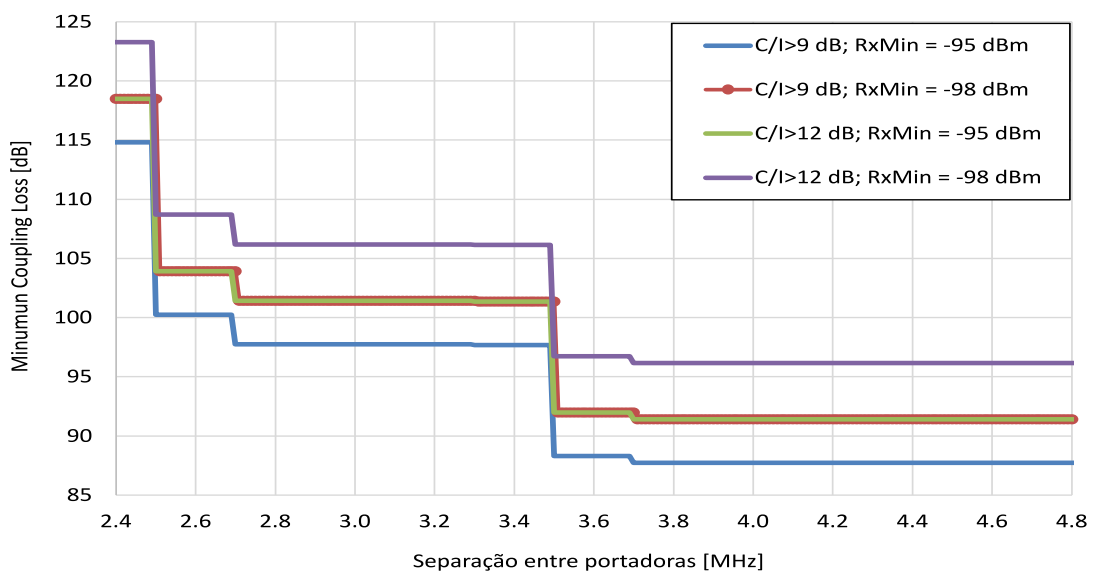


Figura 3.36: MCL entre a estação base GSM-R e o terminal móvel 5G 900 (*Uplink*).

3.5.4 Análise Global

Estes valores mínimos de atenuação configuram o limite determinado para que não ocorra dessensibilização a nível da estação base e do terminal móvel GSM-R. Nas Figuras 3.31, 3.32, 3.33 e 3.34 são apresentadas as curvas correspondentes a situações de níveis de sinal mínimos de -95 e de -98 dBm, sendo estes os valores mínimos previstos para as fronteiras das células, de acordo com especificações EIRENE, tendo em conta uma probabilidade de cobertura de 95% em cada segmento de 100 m. São apresentadas as situações de C/I mínima de 9 dB para voz e de 12 dB para dados. Os valores apresentados são determinados tendo em conta apenas a interferência proveniente da estação base e do terminal móvel UMTS e LTE 900, e não considerando interferência intra sistema GSM-R.

De modo a ser possível comparar o MCL entre as diferentes redes, na Figura 3.37 segue a devida comparação apenas para a situação mais limitativa correspondente a situações de níveis de sinal mínimos de -98 dBm e com um C/I mínimo de 12 dB para dados.

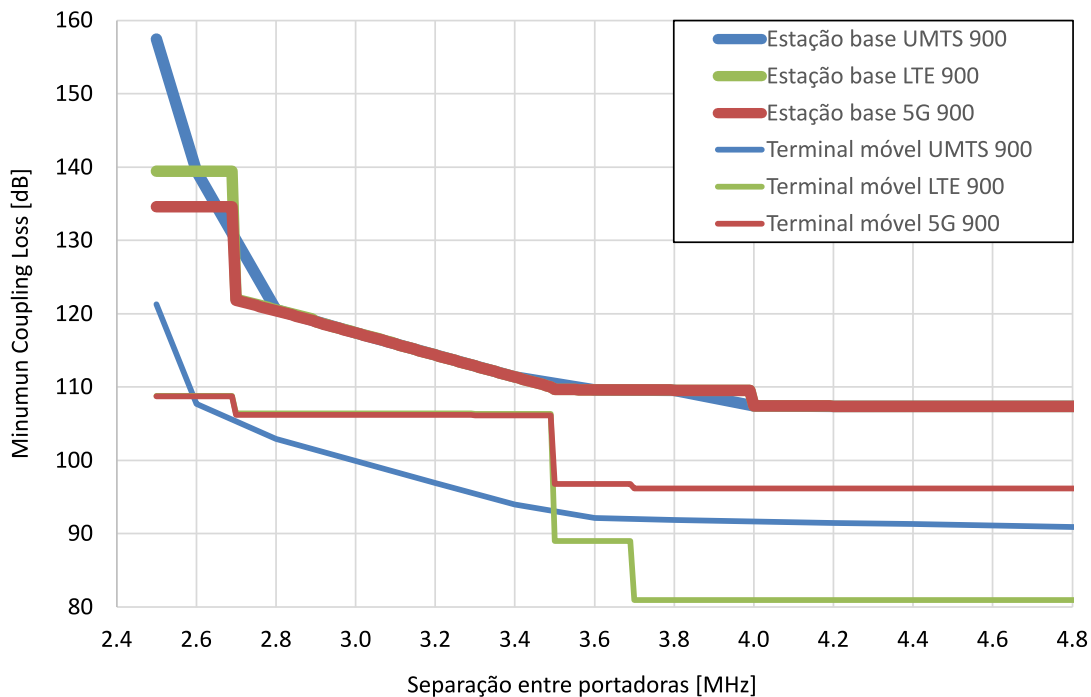


Figura 3.37: Comparação dos valores de MCL entre a estação base GSM-R e as estações base e terminais móveis das redes UMTS, LTE e 5G 900.

Nas Tabelas 3.2 e 3.3 segue um resumo da Figura 3.37, de modo a ser possível identificar a ligação e a tecnologia com mais impacto em termo de interferência nas redes GSM-R.

Tabela 3.2: Comparação de MCL para *Downlink*.

| C/I [dB] | RxLev [dBm] | MCL UMTS [dB] | | MCL LTE [dB] | | MCL 5G [dB] | |
|-------------|----------------|------------------|---------|-----------------|---------|----------------|---------|
| | | 2.8 MHz | 4.8 MHz | 2.8 MHz | 4.8 MHz | 2.8 MHz | 4.8 MHz |
| | | 12 | -98 | 120.55 | 107.36 | 120.55 | 107.36 |

Tabela 3.3: Comparação de MCL para *Uplink*.

| C/I [dB] | RxLev [dBm] | MCL UMTS [dB] | | MCL LTE [dB] | | MCL 5G [dB] | |
|-------------|----------------|------------------|---------|-----------------|---------|----------------|---------|
| | | 2.8 MHz | 4.8 MHz | 2.8 MHz | 4.8 MHz | 2.8 MHz | 4.8 MHz |
| | | 12 | -98 | 102.94 | 90.88 | 106.41 | 80.95 |

Pela análise das Tabelas 3.2 e 3.3, é possível identificar que a ligação mais prejudicial em termos de MCL necessário para não existir interferência nas redes GSM-R por parte das outras, é a em *downlink*. Também é possível observar que a rede mais prejudicial, em *downlink*, é o UMTS, em quase todo o domínio, quando o espaçamento entre portadoras é inferior a 2.8 MHz, sendo que para valores superiores as redes três redes apresentam valores muito próximos. No caso em *uplink* o UMTS é o mais prejudicial quando o afastamento é inferior a 2.6 MHz, entre os 2.6 MHz e os 3.5 MHz passam a ser as redes LTE e 5G e quando é superior a 3.5 MHz o 5G passa a ser o mais prejudicial.

3.5.5 Distância de Isolamento

Considerando os resultados do MCL, e aplicando o modelo de propagação utilizado e calibrado para comunicações ferroviárias, é possível determinar as distâncias mínimas para isolamento ($D_{isol} Min$) (3.12), tanto em *downlink* (mais limitativa) como em *uplink* [24].

$$D_{isol} Min = 10^{\frac{F_M + MCL - 118.4}{60}} \quad (3.12)$$

onde, F_M corresponde à margem de desvanecimento para ferrovias (8 dB) [24] e o MCL corresponde às curvas apresentadas anteriormente,

Assim sendo, na Figura 3.38 são apresentados os valores para a situação de mediana de sinal (percentil 50) nos casos da ligação em *downlink* e *uplink*, tendo em conta uma margem de desvanecimento para ambientes ferroviários. É de salientar que nas Figura apenas é apresentada a comparação apenas para a situação mais limitativa correspondente a situações de níveis de sinal mínimos de -98 dBm e com um C/I mínimo de 12 dB para dados.

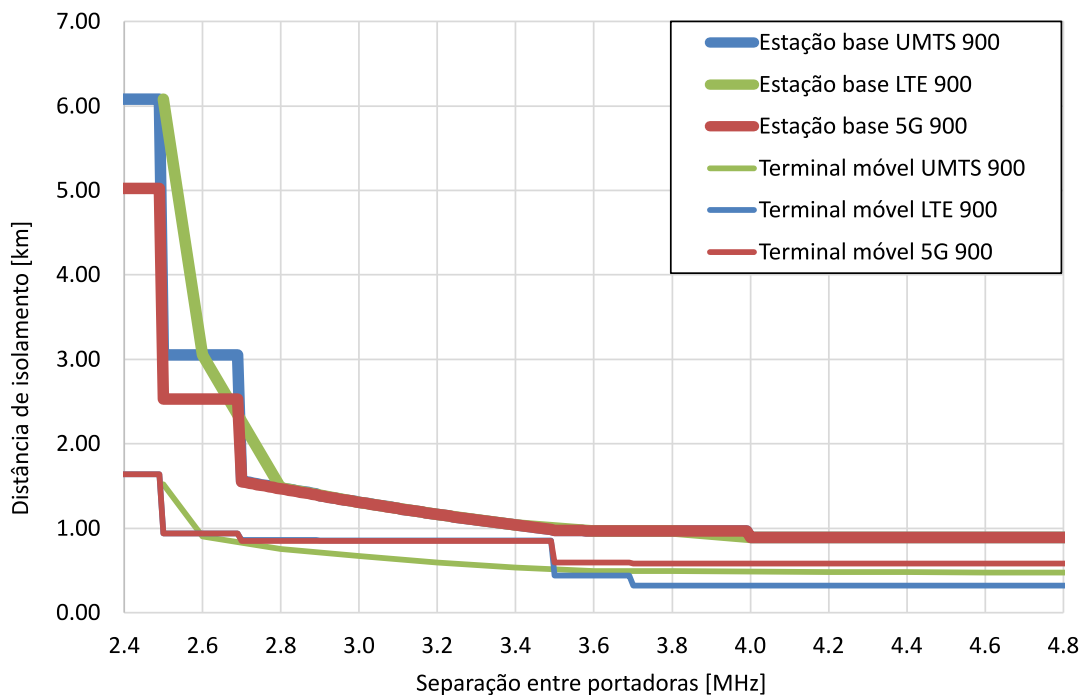


Figura 3.38: Comparação das distâncias mínimas de isolamento, tendo em conta o modelo de propagação definido em [24].

Uma vez mais, pela análise das Figuras 3.38, é possível concluir que a ligação mais prejudicial em termos de interferência é a ligação em *downlink*, uma vez que as distâncias de isolamento são maiores, face às mesmas, para a ligação em *uplink*. Enquanto que a rede mais prejudicial (em quase todo o domínio) em *downlink* é o UMTS para valores inferiores a 2.8 MHz, assim como acontecia no caso anterior no cálculo do MCL. Para valores superiores as três redes apresentam valores de distância de isolamento bastante semelhantes. Em *uplink*, a rede 5G apresenta os maiores valores de isolamento necessários para não existir interferência entre o terminal móvel e a estação base GSM-R, sendo que apenas para separações de portadoras entre os 2.5 MHz e os 2.6 MHz o LTE torna-se a rede mais prejudicial.

Resumindo, pela análise do MCL e da distância de isolamento é possível constatar que a ligação mais limitativa é em *downlink*, tendo em conta que os valores de MCL e da distância de exclusão são sempre maiores, para as mesmas condições (C/I, RxLev e espaçamento entre portadoras), face à ligação em *uplink*. Enquanto que a rede mais prejudicial vai depender da separação entre as portadoras, mas para separações inferiores a 2.8 MHz, o UMTS é a rede mais limitativa.

3.6 Bloqueio do terminal e estação base

Uma vez apurado que a ligação em *downlink* é mais crítica, só será realizado o cálculo do isolamento entre o terminal e a estação base GSM-R e a estação base UMTS, LTE e 5G na banda de 900 MHz, sendo este baseado no princípio definido em [3]. No caso do terminal GSM-R considera-se que o valor mínimo de -38 dBm, utilizado para a separação entre a portadora GSM-R e a frequência limite, tanto do canal UMTS, LTE e 5G, é de 600 kHz. Essa situação corresponderá àquela em que as portadoras utilizadas em UMTS, LTE e 5G se situam a 2.8 MHz da última portadora GSM-R, e portanto, considera-se que o espaçamento ainda se encontra na banda GSM-R.

Na situação da estação base, considera-se o valor de bloqueio especificado para interferências fora-de-banda, pois o desvio de frequência ultrapassa a banda do GSM-R. Assim, neste caso, está especificado o valor de 8 dBm como sendo o máximo admissível. Considerando os valores apresentados anteriormente, obtêm-se os valores apresentados nas Tabelas 3.4 e 3.5.

Tabela 3.4: Isolamento para evitar bloqueio do terminal e estação base GSM-R por parte da estação base UMTS/LTE.

| | Terminal móvel | Estação base | Unidades |
|---|----------------|--------------|----------|
| Estação base UMTS/LTE 900 EIRP (in 200 kHz) | 45.17 | 45.17 | dBm |
| Ganho da antena de receção (GSM-R) | 0.00 | 18.00 | dBi |
| Atenuação de cabos e conectores | 0.00 | 3.00 | dB |
| Margem de desvanecimento | 8.00 | 8.00 | dB |
| Nível máximo de sinal permitido | -38.00 | 8.00 | dBm |
| Isolamento mínimo (atenuação) | 75.17 | 44.17 | dB |
| Distância | 0.190 | 0.058 | km |

Tabela 3.5: Isolamento para evitar bloqueio do terminal e estação base GSM-R por parte da estação base 5G.

| | Terminal móvel | Estação base | Unidades |
|---------------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|
| Estação base 5G 900 EIRP (in 200 kHz) | 40.17 | 40.17 | dBm |
| Ganho da antena de recepção (GSM-R) | 0.00 | 18.00 | dBi |
| Atenuação de cabos e conectores | 0.00 | 3.00 | dB |
| Margem de desvanecimento | 8.00 | 8.00 | dB |
| Nível máximo de sinal permitido | -38.00 | 8.00 | dBm |
| Isolamento mínimo (atenuação) | 70.17 | 39.17 | dB |
| Distância | 0.157 | 0.048 | km |

Comparando as Tabelas 3.4 e 3.5, a distância de isolamento necessária entre a estação base das redes UMTS, LTE e a estação base 5G face ao terminal móvel GSM-R desce de 190 m para 157 m, tal como seria expectável, uma vez que a potencia de emissão máxima no 5G é inferior à das outras redes. No outro caso, a distância de isolamento necessária entre o terminal móvel das redes UMTS, LTE e o terminal móvel 5G face à estação base GSM-R desce de 58 m para 48 m.

4

Caso de Estudo

Uma vez caracterizados todos os parâmetros necessários para estimar o impacto da interferência no GSM-R é possível medir este impacto em redes reais em funcionamento nos dias de hoje.

Posto isto, este capítulo tem como objetivos caracterizar o cenário em estudo neste trabalho, apresentar a ferramenta utilizada para este cálculo tendo em conta o módulo desenvolvido neste trabalho, que passou pela implementação de toda a metodologia/software utilizada para o cálculo do C/I e a respetiva conversão para RxQual, e por fim, demonstrar os resultados obtidos no que diz respeito ao impacto que as redes UMTS têm nas redes GSM-R, aplicando todos os conhecimentos transmitidos nos capítulos anteriores.

4.1 Cenário de Estudo - Linha de Cascais

Neste trabalho, foi realizado o estudo do impacto que as redes dos operadores públicos têm nas redes implementadas pelos operadores ferroviários na Linha de Cascais. De seguida é caracterizada a rede que está a operar neste momento na Linha de Cascais, apresentada a sonda que realizou as medidas rádio e os parâmetros recolhidos que são necessários para a realização deste trabalho.

4.1.1 Caracterização da rede de Cascais

O cenário em estudo, representado na Figura 4.1, tem as seguintes características:

- Cerca de 25 km.
- 9 estações e 8 apeadeiros.
- 5 estações base GSM-R.



Figura 4.1: Linha de Cascais.

Na Tabela 4.1, é possível verificar, as estações base em funcionamento e o seu respetivo *Cell ID*, as portadoras *Broadcast Control Channel* (BCCH) e *Traffic Channel* (TCH) e ainda perceber que cada estação base utiliza duas portadoras TCH de modo a garantir a redundância na rede. É de salientar que esta configuração correspondia à rede piloto implementada e não à atual.

Tabela 4.1: Portadoras TCH do GSM-R na Linha de Cascais.

| Cell ID | Nome do site | Canal BCCH | Canal TCH |
|---------|---------------|------------|-----------|
| 014C | Alcântara | 955 | 955 / 961 |
| 02DC | Pedrouços | 959 | 959 / 965 |
| 0534 | Paço d'Arcos | 969 | 963 / 969 |
| 0660 | PK 16.865 (A) | 967 | 967 / 973 |
| 06C4 | PK 16.865 (B) | 955 | 955 / 961 |
| 091C | São João | 959 | 959 |

4.1.2 Equipamento e metodologia de recolha de medidas rádio

Tendo em conta o cenário descrito anteriormente, foram realizados *drive tests* de modo a obter os sinais proveniente da rede GSM-R e UMTS na linha férrea de Cascais. Estes testes foram realizados através de uma sonda colocada na cabine do maquinista do comboio, como se pode visualizar na Figura 4.2 a foto do equipamento utilizando.



Figura 4.2: Sonda utilizada para recolha de medidas na Linha de Cascais.

Na Figura 4.3, é representado o diagrama da metodologia implementada para a recolha de medidas.

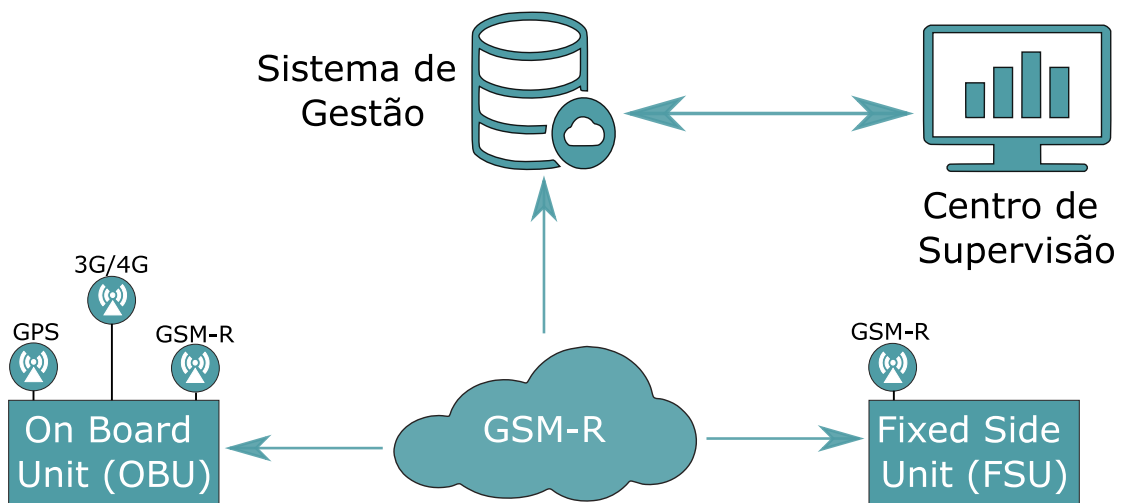


Figura 4.3: Metodologia utilizada para recolha de medidas na Linha de Cascais.

Como é demonstrado na Figura 4.3, os testes são realizados entre dois equipamentos: a *On Board Unit* (OBU) e a *Fixed Side Unit* (FSU), utilizando como rede de acesso a rede GSM-R. Deste modo, é possível recolher uma série de parâmetros rádio não só do GSM-R como das tecnologias UMTS e LTE dos operadores públicos. Além disso ainda são recolhidos vários parâmetros *Global Positioning System* (GPS) de modo a saber a localização do comboio. Posto isto, na Figura 4.4 é representado a velocidade do comboio por Ponto Quilométrico (PK), representado

assim, a trajetória do comboio ao longo de todas as viagens realizadas durante a campanha de medidas.

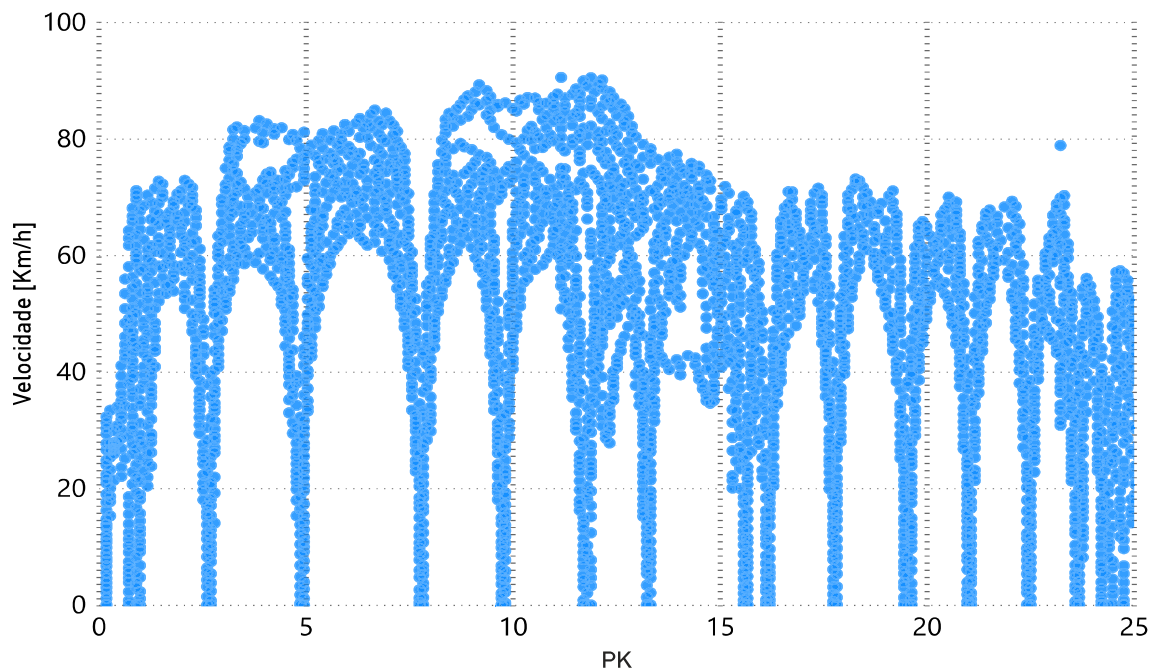


Figura 4.4: Movimento do comboio ao longo da Linha de Cascais.

Pela análise da Figura 4.4, é possível identificar a variação da velocidade ao longo da Linha de Cascais, demonstrando o correto funcionamento do sistema de georreferenciação da sonda, tendo em conta que a velocidade reduz quando o comboio se está a aproximar de uma estação. Isto também serve para validar o processamento que foi necessário implementar neste trabalho, dos campos recolhidos pelos modem's instalados na sonda.

4.1.3 Medidas rádio

Uma vez explicado o funcionamento do equipamento de recolha de medidas, na Figura 4.5 seguem as médias de ambos os sinais recolhidos por PK e por portadora GSM-R. É de salientar, que as medidas realizadas no UMTS foram feitas na portadora 2963 -> 932.6 MHz.

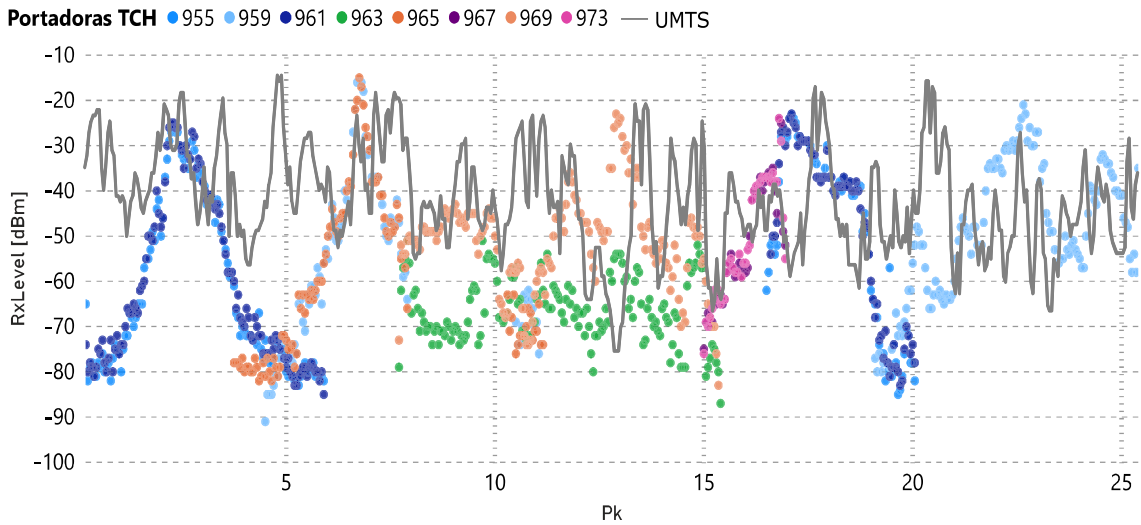


Figura 4.5: Cobertura GSM-R e UMTS na Linha de Cascais.

Como é possível visualizar na Figura 4.5, o sinal UMTS que chega à Linha de Cascais é bastante significativo, o que contribuirá para uma maior interferência por parte dessa mesma rede.

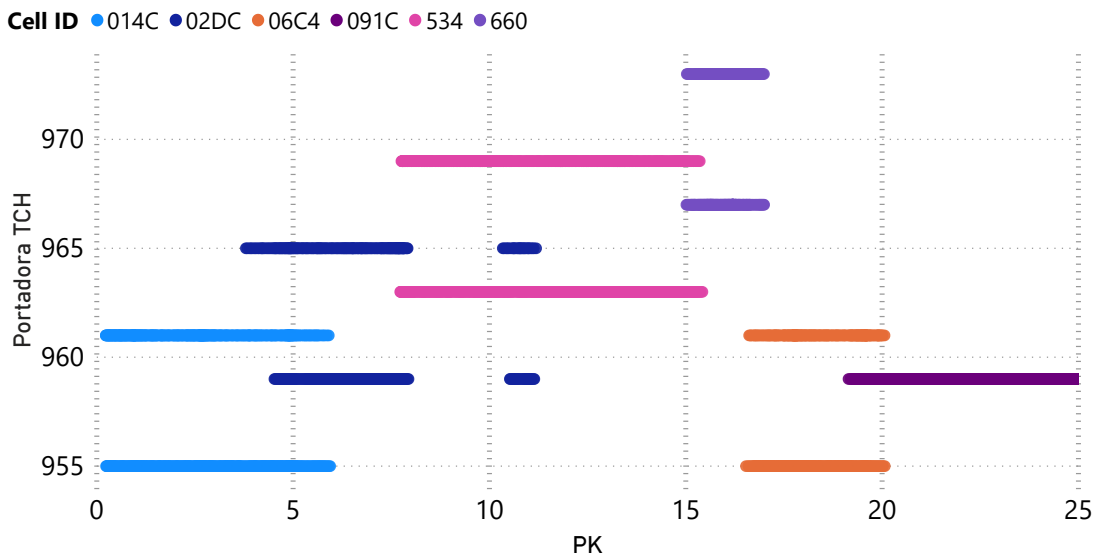


Figura 4.6: Portadoras TCH do GSM-R na Linha de Cascais.

Ao analisar a Figura 4.6 é possível verificar que as margens de *handover* estão mal atribuídas por volta do PK 11, o que pode levar a uma interferência maior.

Durante os *drive tests* também foi medido o parâmetro RxQual, que se encontra exposto na Figura 4.7.

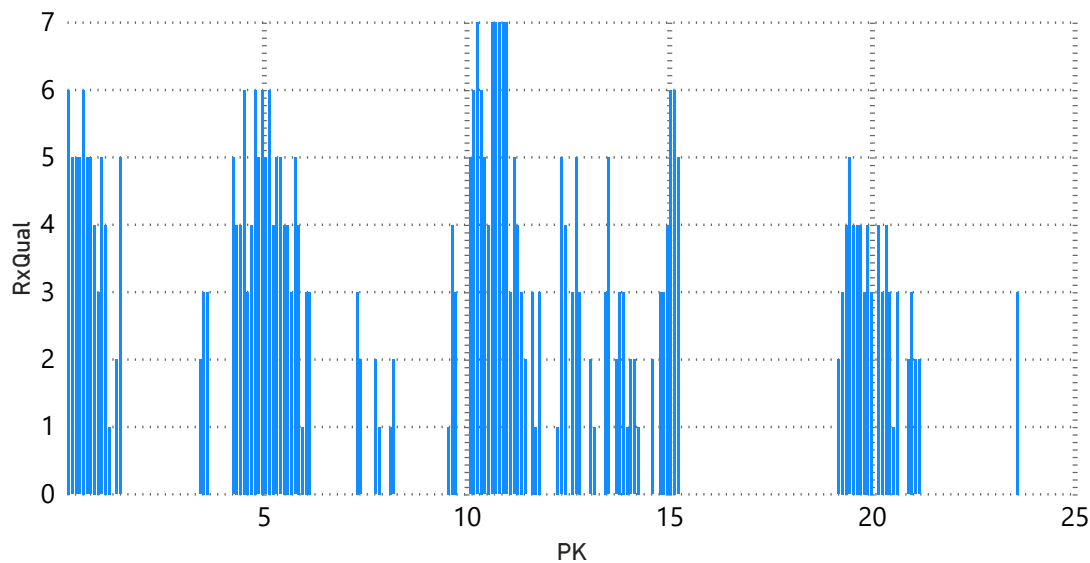


Figura 4.7: RxQual ao longo da Linha Cascais.

Ao analisar a Figura 4.7, é possível constatar que fazendo o paralelismo com a Figura 4.5, quando o sinal UMTS é mais elevado face ao sinal GSM-R a interferência aumenta, como era de se esperar. Uma vez que o objetivo desta dissertação é medir o impacto que as redes UMTS têm nas redes GSM-R, é necessário estimar as interferências *Inter* e *Intra Network* (interferência *Intra* + *Inter Network*) em separado, de modo a clarificar esta influência.

4.2 Desenvolvimento da aplicação

Para o desenvolvimento do algoritmo responsável pelo cálculo da interferência, foi projetado um módulo que pudesse ser integrado numa ferramenta de planeamento de redes móveis, denominada por SIGRail, que será apresentada de seguida. Na implementação deste módulo foi desenvolvido todo o modelo de dados necessário, assim como a respetiva programação, de forma a que o mesmo fosse inserido sem afetar o correto funcionamento da ferramenta existente.

4.2.1 Ferramenta *SIGRail Planning*

Na Figura 4.8 segue a página principal da ferramenta. É de salientar que apenas será dada a informação relevante para o que esta dissertação trata, não sendo suposto apresentar a ferramenta na íntegra.

4. CASO DE ESTUDO

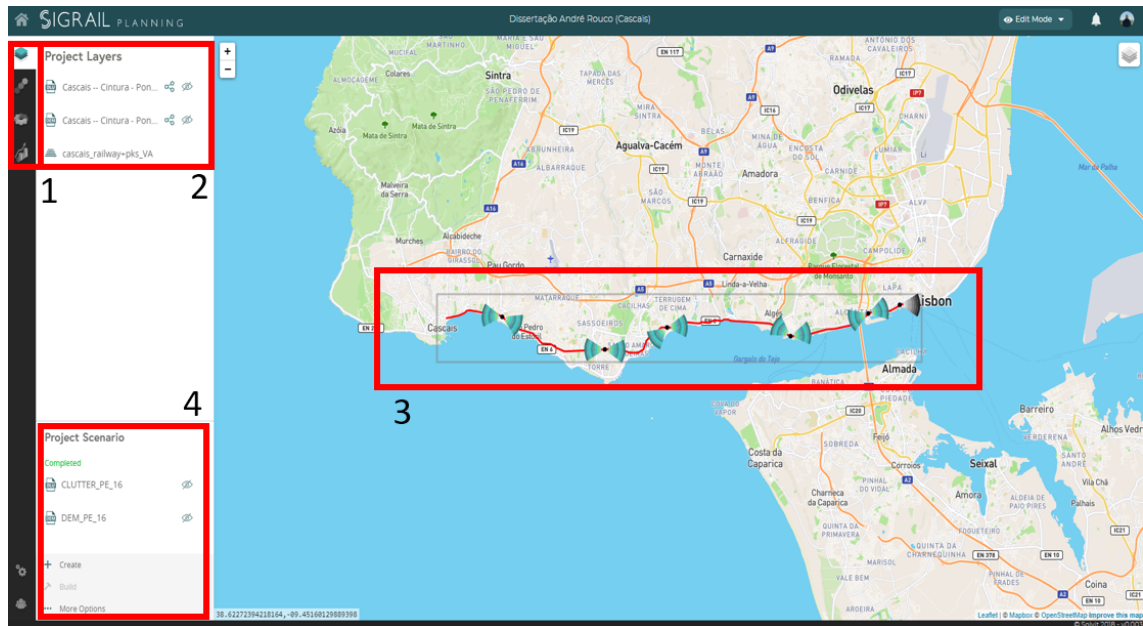


Figura 4.8: Ferramenta SIGRail - Página principal.

Como é possível identificar pela visualização da Figura 4.8, existem quatro secções principais na página principal:

- 1 - Menu principal: *Layers, Networks, Simulations e Analysis Reports.*
- 2 - Camadas necessárias para a devida criação do cenário onde é suposto fazer o planeamento (*Digital Elevation Model (DEM)'s, Clutters, Linhas Férreas, etc.*)
- 3 - Cenário de estudo, com a representação da linha férrea e das estações base.
- 4 - Menu de criação/adição das camadas mencionadas em 2.

Apresentada a página principal, de seguida é introduzida a página demonstrativa da criação de uma *network*, Figura 4.9, e explicada a sua metodologia.

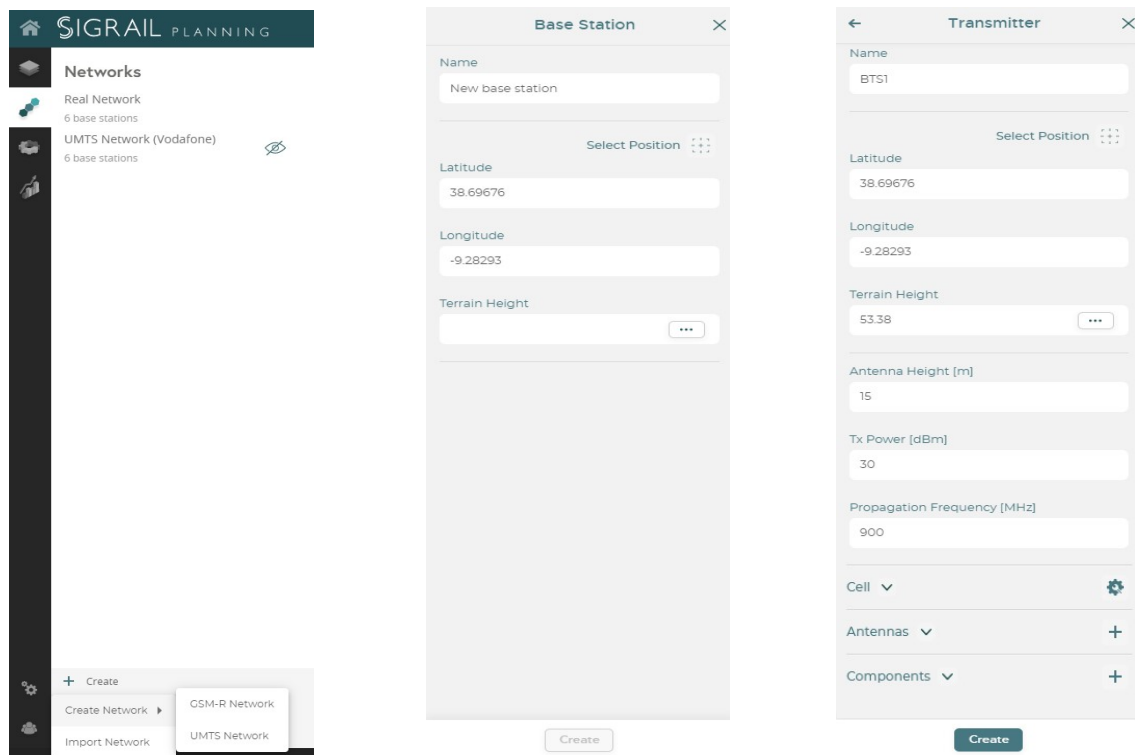
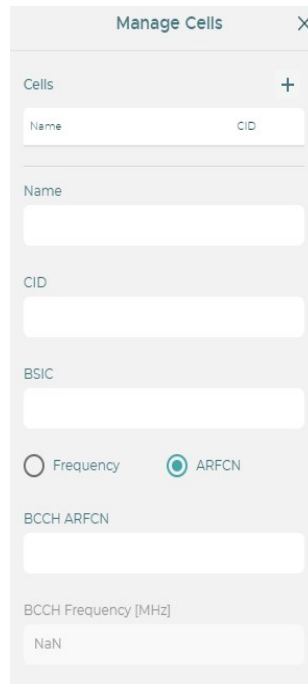


Figura 4.9: Ferramenta SIGRail - Página para criação de uma *Network*.

Na Figura 4.9, é possível constatar que é permitido criar dois tipos de *networks*: GSM-R e UMTS (implementado para a realização deste trabalho), que são os dois casos utilizados nesta dissertação. Ao ser criada uma *network* é necessário que se lhe adicionem estações base. Criadas as estações base, é necessário acrescentar *transmitters*, inserir o número e o tipo das antenas, dependendo da configuração, utilizada por cada estação base (bisetorizada, trisetorizada, etc) e os componentes atenuantes (cabos, *splitters*, etc). Uma vez mais, para a realização deste trabalho foi necessário adicionar a configuração das células correspondentes a cada *transmitter*, como é possível observar na Figura 4.10. Esta configuração é bastante importante para o cálculo da interferência, pois a frequência da célula é definida aqui e será utilizada posteriormente, como se demonstrará mais adiante no presente documento.



The image shows a mobile application interface titled "Manage Cells" with a close button (X) in the top right corner. Below the title is a "Cells" section with a plus sign (+) for adding new cells. The form contains several input fields: "Name", "CID", "BSIC", "BCCH ARFCN", and "BCCH Frequency [MHz]". There are two radio buttons: "Frequency" (unselected) and "ARFCN" (selected). The "BCCH Frequency [MHz]" field contains the text "NaN".

Figura 4.10: Ferramenta SIGRail - Página para criação de uma célula.

Na Figura 4.10, é possível visualizar que a configuração da célula tem de ter um nome, um *Cell ID*, um *Base Station Identity Code* (BSIC) e que a frequência pode ser inserida de duas formas, em *Absolute Radio Frequency Channel Number* (ARFCN) ou em MHz.

Por fim, é necessário criar as respetivas simulações. Neste trabalho foram implementadas duas novas simulações: a *Railway Intra Cell Interference Simulation* e a *Railway Inter Network Interference Simulation*, como é representado na Figura 4.11.

Figura 4.11: Ferramenta SIGRail - Página para criação de uma simulação.

Pela análise da Figura 4.11, conclui-se que as diferenças entre as simulações referidas anteriormente, recaem no fato de, na simulação *Railway Intra Cell Interference Simulation* apenas ser possível escolher uma *network*, uma vez que só é calculada a interferência provocada pela própria rede GSM-R, por outro lado, na simulação *Railway Inter Cell Interference Simulation* é necessário escolher duas *networks*, a vítima e a interferente.

Tendo em conta que a própria rede GSM-R causa interferência nela mesma, assim como as redes vizinhas, é necessário separar a implementação em duas etapas distintas: a interferência *Intra Network* e a *Inter Network*. De salientar que, como foi demonstrado anteriormente, apenas será implementado o cálculo da interferência para a ligação mais prejudicial, que é em *downlink*.

4.2.2 Interferência na própria rede

Nas simulações realizadas em linhas férreas, é assumido que se sabe sempre todas as posições possíveis do terminal móvel, uma vez que este está a bordo do comboio que as percorre. Posto isto, toda a análise será realizada por PK, o que a facilita, quer ela seja de cobertura, quer de interferência.

Como o objetivo desta dissertação passa por medir o impacto que as redes móveis adjacentes às ferrovias têm sobre as redes GSM-R, é necessário analisar ambas a interferências (Intra e Inter *Network*) em separado.

Para o cálculo da interferência existem dois parâmetros fundamentais que têm de ser analisados, que são a frequência das portadoras, tanto das vítimas como das interferentes, e a potência, que neste caso específico, chega ao mesmo ponto da linha férrea, proveniente de todas as estações base usadas para a análise.

Numa primeira fase é necessário percorrer todas as estações base GSM-R assumindo que todas podem ser vítimas e interferentes, menos no caso das redes UMTS que são sempre interferentes, tendo em conta que o objetivo deste trabalho é analisar o impacto que essas redes têm nas redes GSM-R.

Assim sendo, é preciso descobrir a separação entre a portadora da vítima (f_{vitima}) e as portadoras das interferentes ($f_{Interferente}$), como é possível verificar em (4.1).

$$\Delta f = |f_{vitima} - f_{Interferente}| \quad (4.1)$$

Consoante o desvio calculado anteriormente (Δf), tem de se determinar o valor correspondente de ACIR por tecnologia (gráficos presentes no Capítulo 4). Posteriormente é possível calcular o OBE das interferentes como é demonstrado em (4.2).

$$OBE_{linear} = 10^{(P_{rxI} - ACIR)} \quad (4.2)$$

onde, OBE_{linear} são as emissões fora-de-banda em valores lineares (mW), P_{rxI} é a potência de receção no terminal móvel proveniente das interferentes (mW) e o $ACIR$ é o valor de ACIR correspondente ao Δf , calculado anteriormente, e à tecnologia interferente (dB).

De seguida é necessário fazer o somatório de todos os OBE_{linear} , como é descrito em (4.3).

$$P_{int} = \sum OBE_{linear} \quad (4.3)$$

onde, P_{int} é a potência interferente (mW).

Seguidamente, é calculado a figura de ruído (N_f), (4.4), para o terminal móvel

GSM-R, com o auxílio dos parâmetros definidos na Tabela 2.2.

$$N_f = KT + 10\log_{10}(LB_{GSM-R} * 1000) + F + C_l \quad (4.4)$$

onde, KT diz respeito à densidade de ruído térmico dada por 174 dBm/Hz, LB_{GSM-R} é a largura de banda (kHz) do GSM-R, F corresponde ao *Noise factor* e por fim, o C_l são os *Cable loses* (dB).

Calculada a figura de ruído, esta é somada ao P_{int} , resultando assim na potência interferente total ($P_{int Total}$), como é representado em (4.5).

$$P_{int Total} = 10\log_{10}(P_{int} + N_f) \quad (4.5)$$

Por fim, é possível calcular o C/I através da subtração entre a potência de recepção no terminal móvel proveniente das vítimas (P_{rxV}) com a potência interferente total $P_{int Total}$, como é representado em (4.6).

$$C/I = P_{rxV} - P_{int Total} \quad (4.6)$$

Uma vez calculado o C/I , é necessário convertê-lo para $RxQual$ através de um mapeamento. Uma vez que esta transformação tem a ver com as características do terminal móvel (filtros, *hardware*, etc.) não existem normas que o clarifiquem, assim sendo, foi considerado como base as margens definidas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Tabela de mapeamento de $RxQual$ para C/I [25]).

| $RxQual$ | C/I |
|----------|-----------------|
| 0 | $[20, +\infty[$ |
| 1 | $[18, 20[$ |
| 2 | $[16, 18[$ |
| 3 | $[14, 16[$ |
| 4 | $[11, 14[$ |
| 5 | $[9, 11[$ |
| 6 | $[4, 9[$ |
| 7 | $] -\infty, 4[$ |

4.2.3 Interferência proveniente de redes públicas

Para calcular a interferência *Inter Network* do UMTS no GSM-R segue-se a mesma metodologia referida anteriormente, sendo depois somada à interferência causada pelo próprio GSM-R. Assim sendo, a única alteração face à metodologia descrita anteriormente traduz-se na substituição de (4.5) por (4.7).

$$P_{int\ Total} = 10\log_{10} (P_{int\ GSM - R} + N_f + P_{int\ UMTS}) \quad (4.7)$$

4.3 Análise de Resultados

De modo a demonstrar a influência referida anteriormente, foi calculado o C/I para o pior caso possível, ou seja, para a potência mínima do sinal proveniente das estações base vítimas que chega a cada ponto da linha e no caso das interferentes (GSM-R e UMTS), o máximo de sinal.

Na Figura 4.12 segue a comparação entre a interferência apenas provocada pelo próprio GSM-R (*Intra Network*) e a interferência causada pela soma da última com a do UMTS (*Inter Network*).

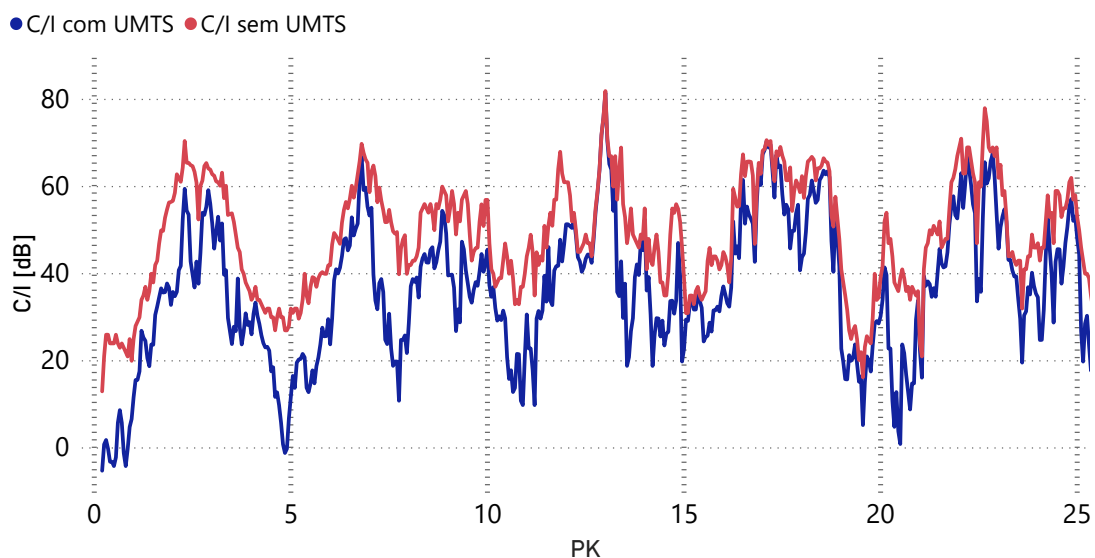
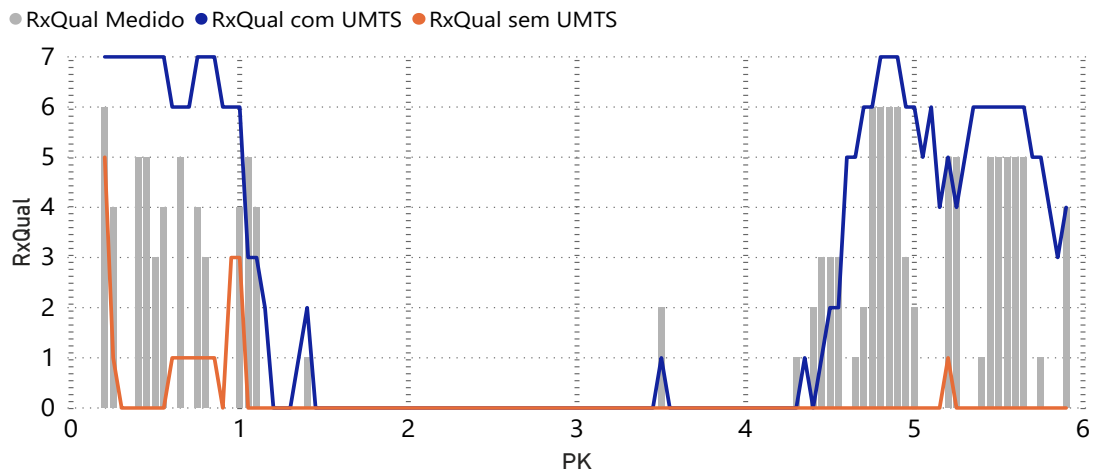


Figura 4.12: C/I com UMTS vs sem UMTS.

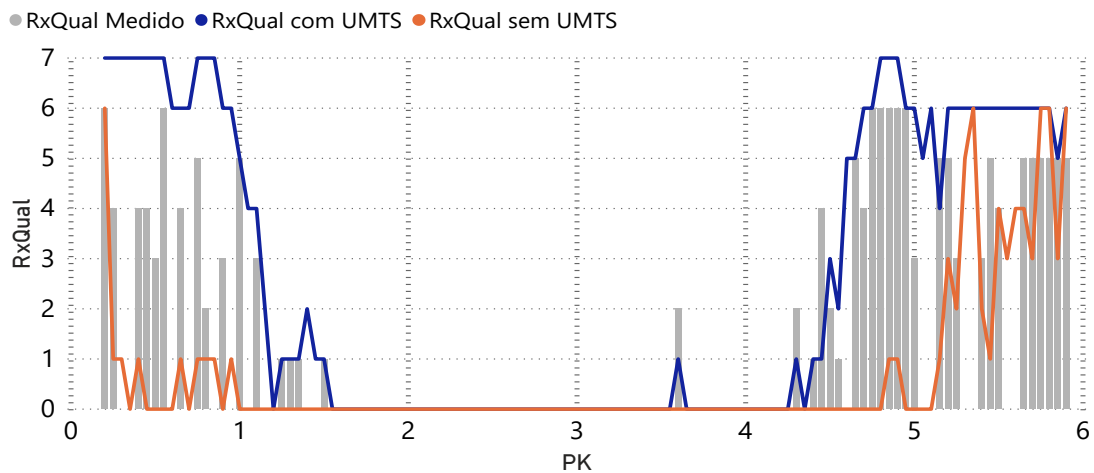
Como é possível observar na Figura 4.12, o impacto provocado pelo UMTS no GSM-R é bastante significativo, lembrando que, como já foi mencionado anteriormente, um $C/I < 9$ torna impossível a existência de comunicações.

4.3.1 Validação do modelo desenvolvido

De forma a evidenciar melhor este impacto e a validar o modelo desenvolvido, nas Figuras 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18, é representada a comparação do RxQual medido com o calculado (com e sem UMTS), por site e portadora TCH.

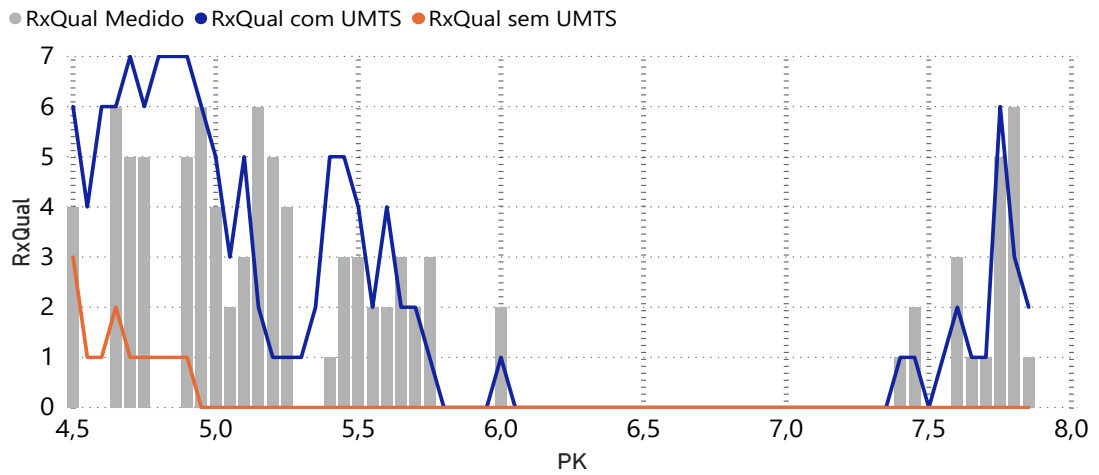


(a) Portadora = 955.

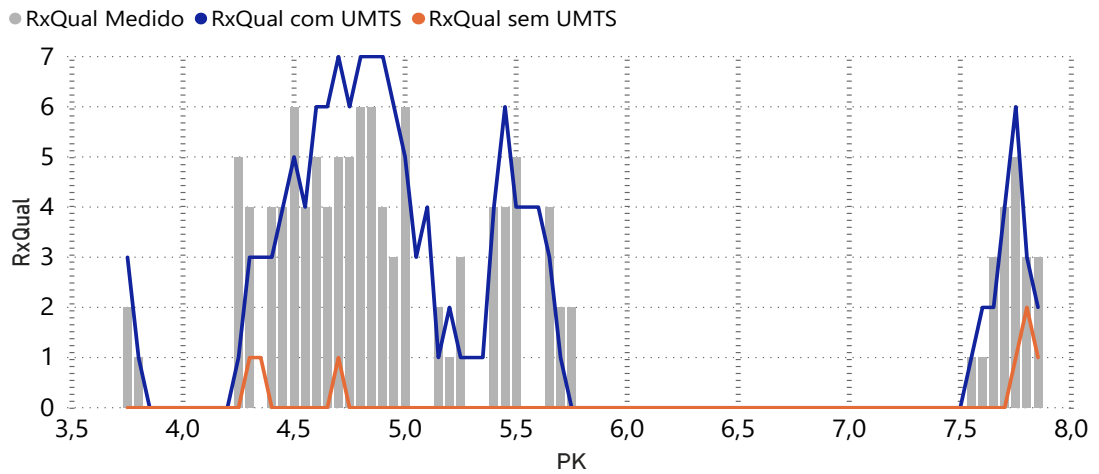


(b) Portadora = 961.

Figura 4.13: RxQual para o site de Alcântara.

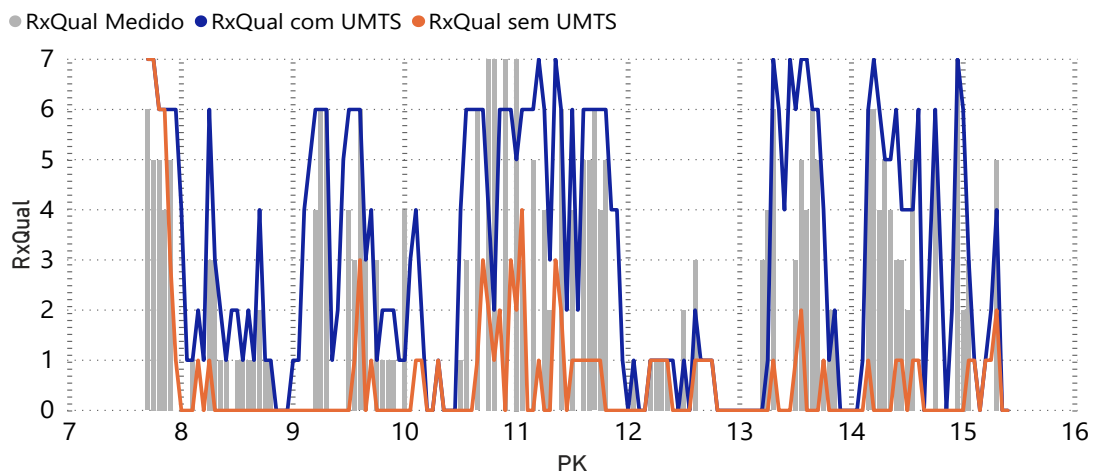


(a) Portadora = 959.

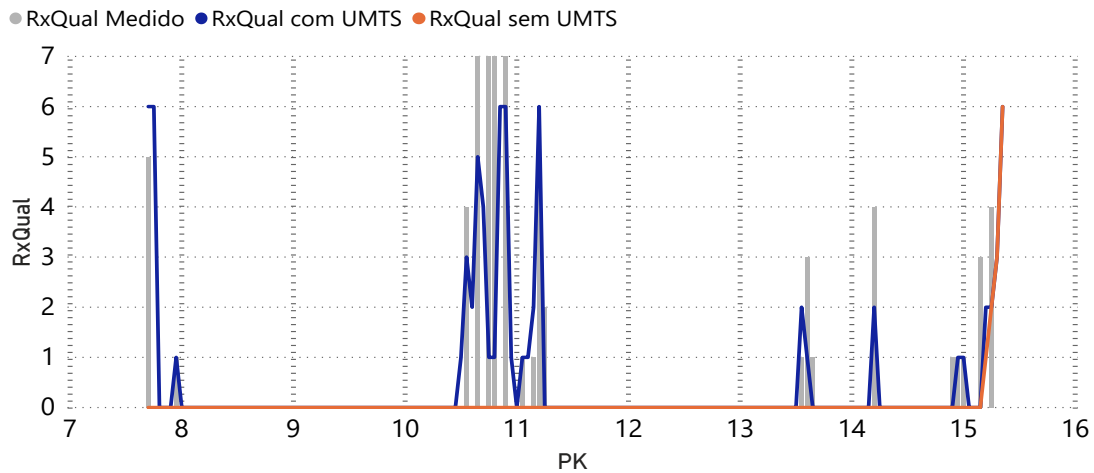


(b) Portadora = 965.

Figura 4.14: RxQual para o site de Pedrouços.

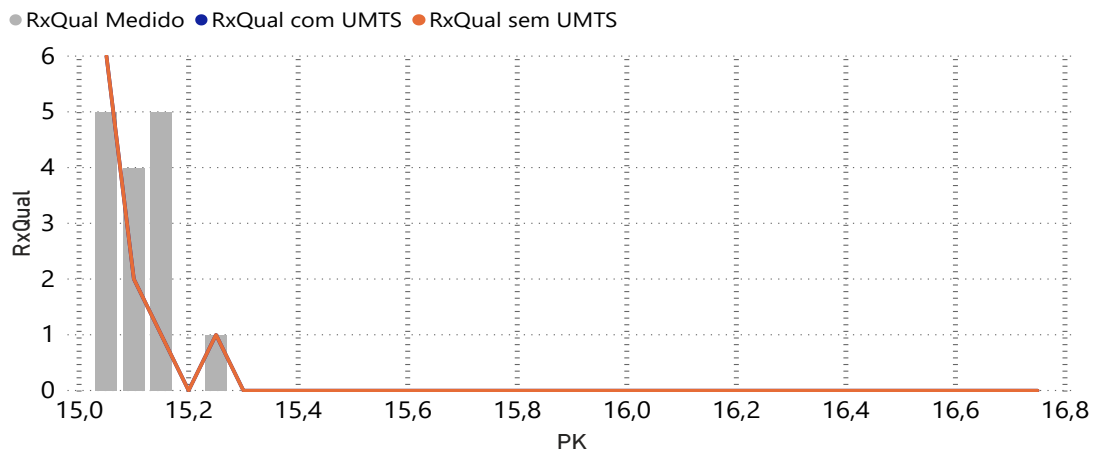


(a) Portadora = 963.

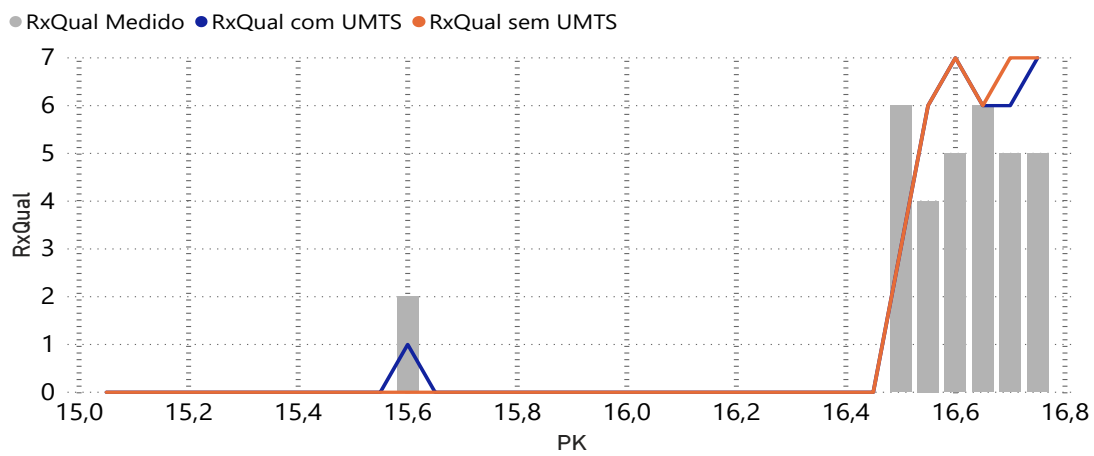


(b) Portadora = 969.

Figura 4.15: RxQual para o site de Paço d’Arcos.



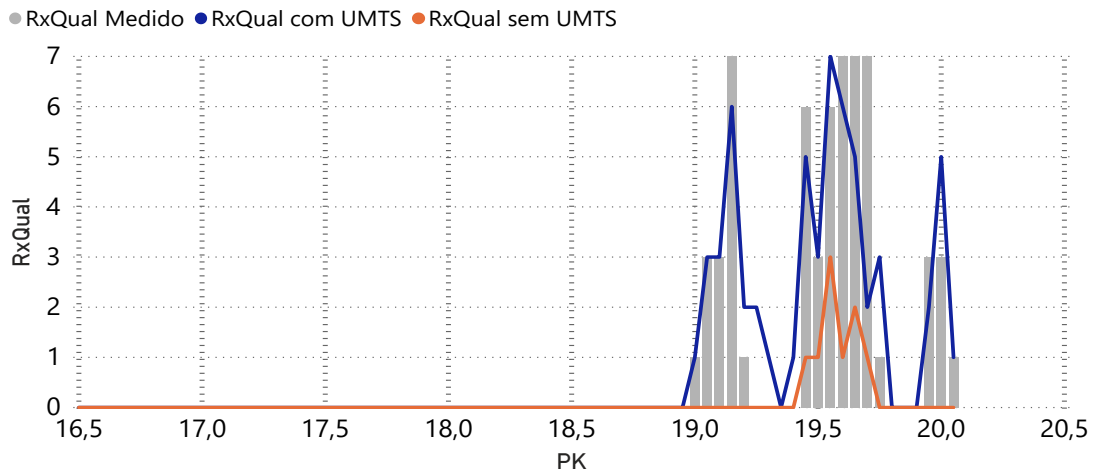
(a) Portadora = 967.



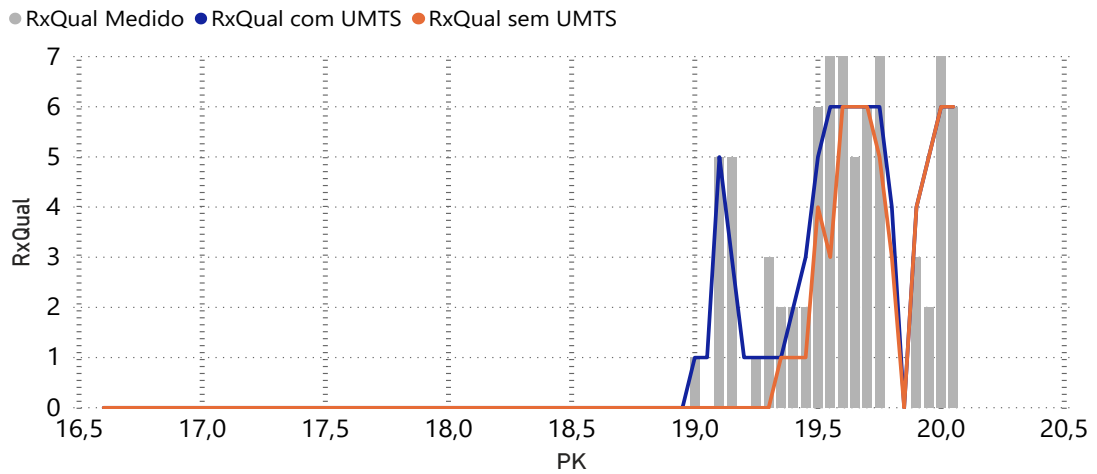
(b) Portadora = 973.

Figura 4.16: RxQual para o site de PK16+865 A.

4. CASO DE ESTUDO



(a) Portadora = 955.



(b) Portadora = 961.

Figura 4.17: RxQual para o site de PK16+865 B.

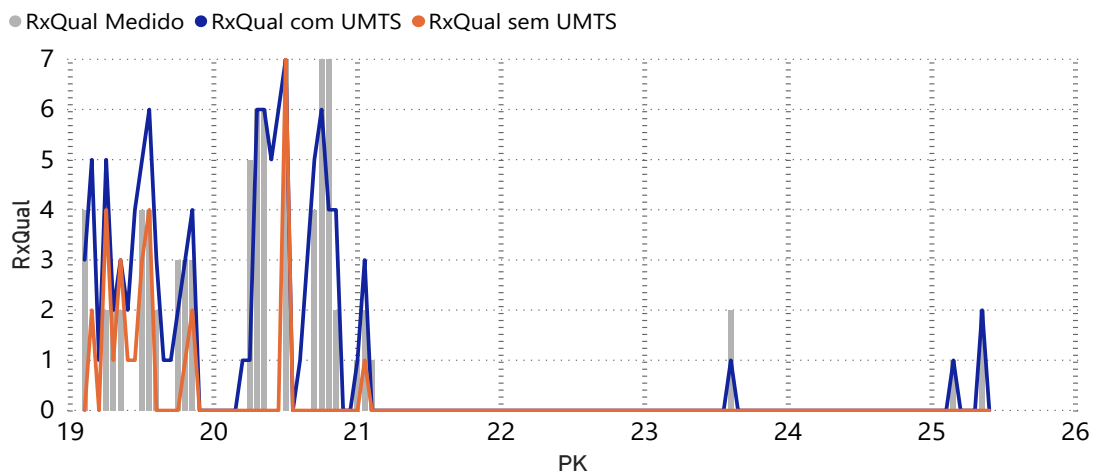
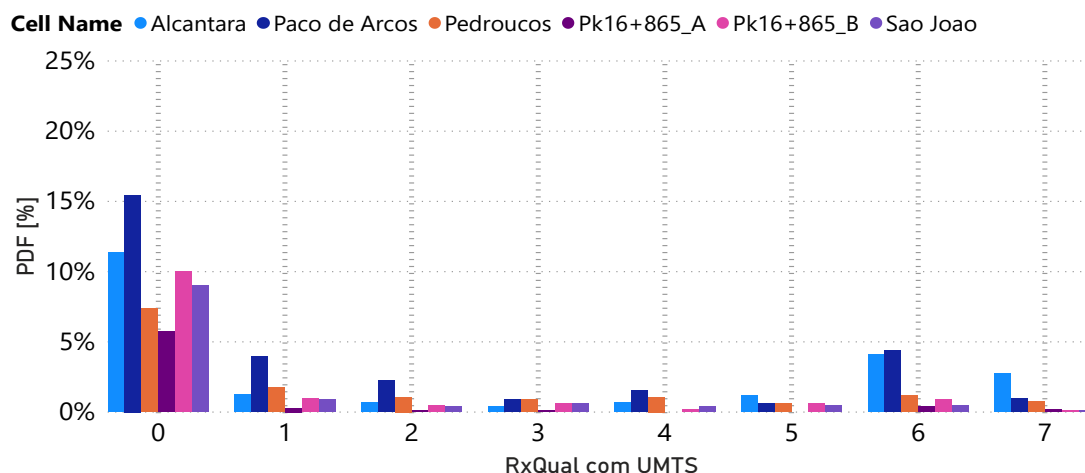
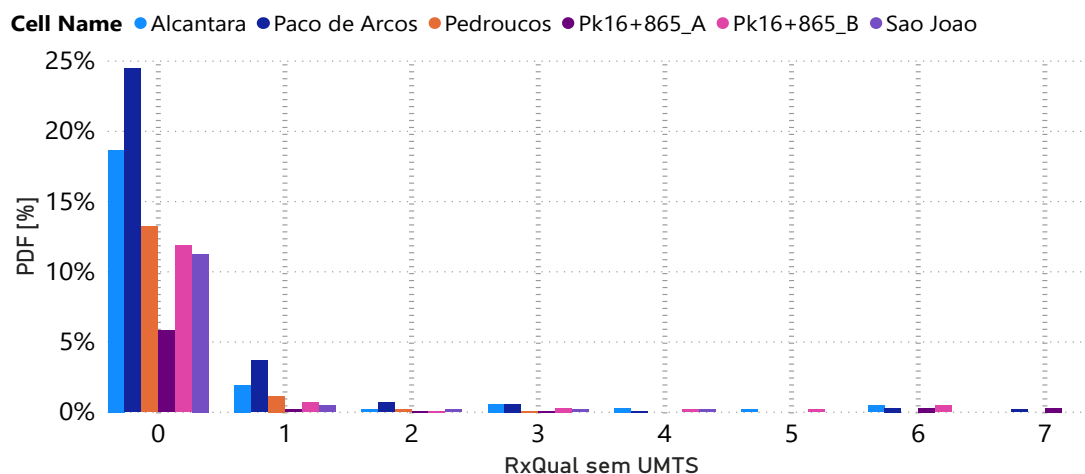


Figura 4.18: RxQual para o site de São João (Portadora = 959).

Analisando as Figuras anteriores, é possível corroborar que o UMTS é bastante prejudicial ao GSM-R. Também é demonstrado que o RxQual calculado é validado pelas medidas, existindo diferenças que têm a ver com o *delay* que possa existir entre medidas e por outros parâmetros externos que não estão a ser tidos em conta nos cálculos teóricos, uma vez que não temos acesso ao código interno do *modem* que recolhe os dados. Posto isto, nas Figuras 4.19a, 4.19b, 4.20a e 4.20b, seguem os histogramas de comparação do RxQual com e sem UMTS por site e portadora, de forma a exibir, de um modo mais generalizado, este impacto.

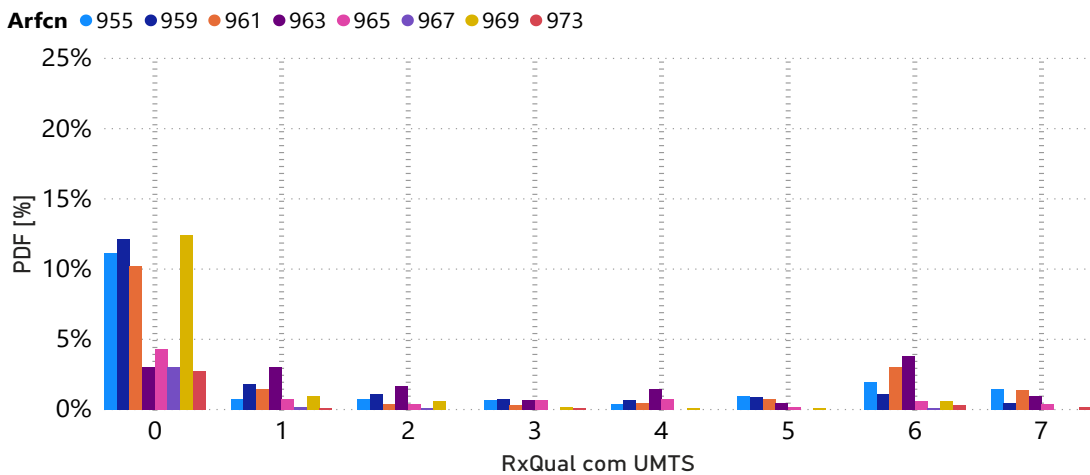


(a) Com UMTS.

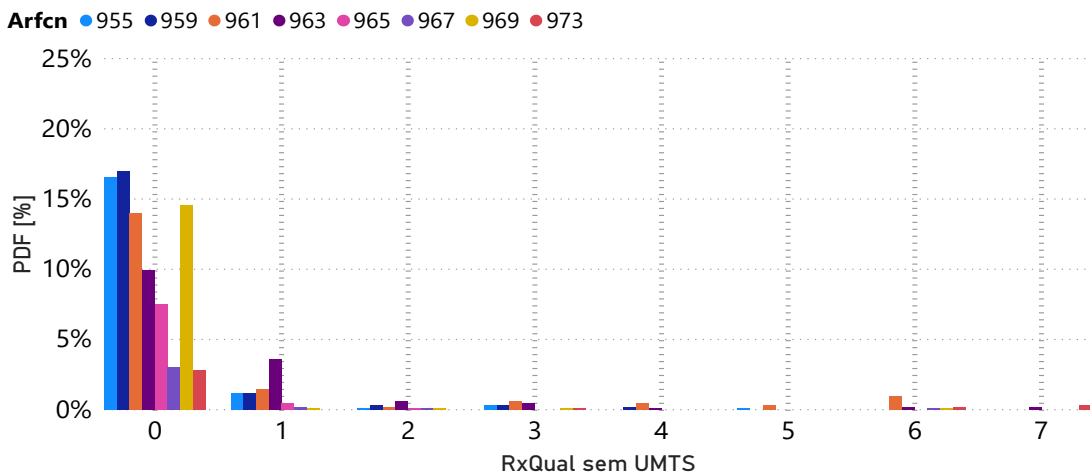


(b) Sem UMTS.

Figura 4.19: Histograma de RxQual por site.



(a) Com UMTS.



(b) Sem UMTS.

Figura 4.20: Histograma de RxQual por portadora.

Uma vez mais, pela análise das Figuras 4.19a, 4.19b, 4.20a e 4.20b, é possível demonstrar que o impacto do UMTS é bastante significativo. Ainda é possível aferir que os sites que mais sofrem com a interferência proveniente, tanto do próprio GSM-R como do UMTS, são os sites de Alcântara e de Paço d'Arcos, o que é reforçado se fizermos a mesma análise anterior, mas desta vez para as portadoras, sendo as mais prejudicadas as que estão a ser utilizadas pelos sites referidos anteriormente, como era expectável.

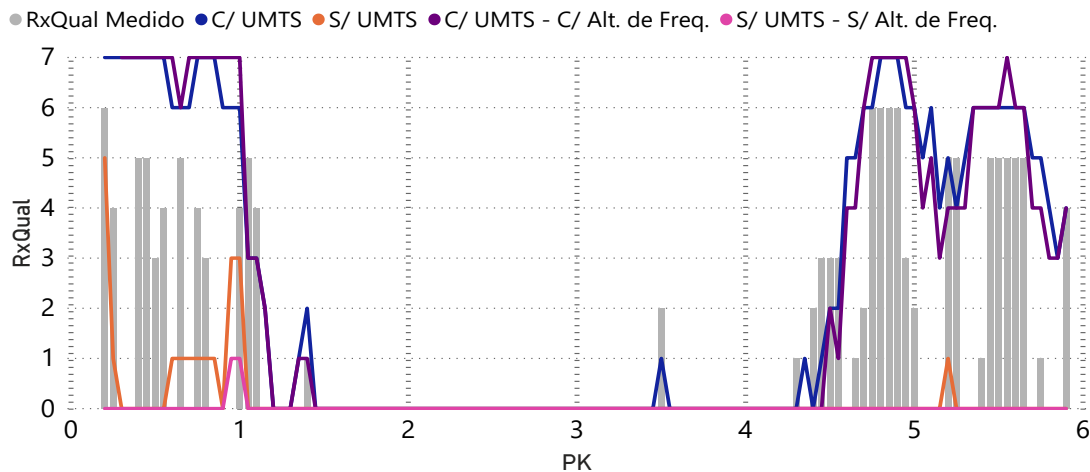
4.3.2 Medidas de mitigação

De modo a tentar resolver a interferência, e apesar de existirem diversas formas de o fazer, neste trabalho foi abordada a troca de frequência no GSM-R. Depois de vários testes, segue na Tabela 4.3 o ajuste de frequências mais significativo.

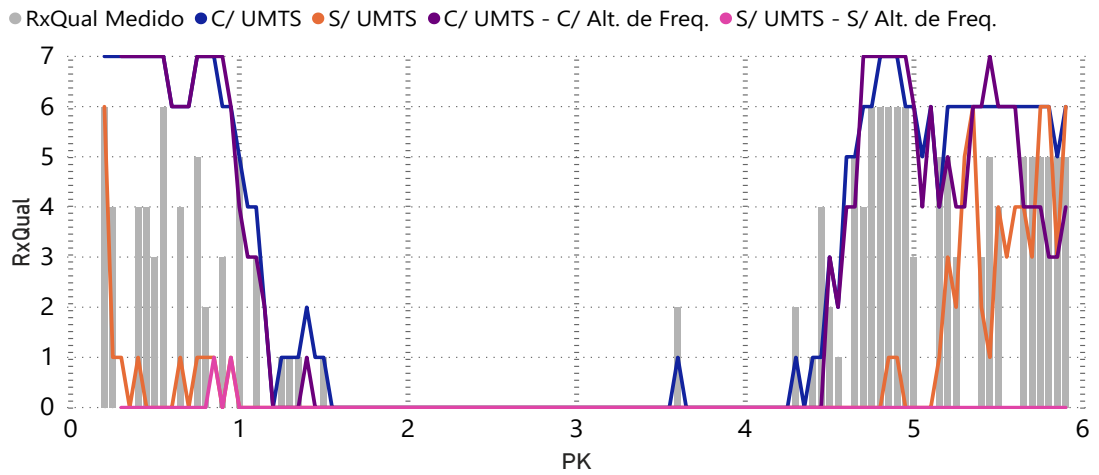
Tabela 4.3: Portadoras TCH do GSM-R na Linha de Cascais depois de alteradas.

| Cell ID | Nome do site | Canal BCCH | Canal TCH |
|---------|---------------|------------|-----------|
| 014C | Alcântara | 955 | 961 |
| 02DC | Pedrouços | 965 | 970 |
| 0534 | Paço d'Arcos | 957 | 961 |
| 0660 | PK 16.865 (A) | 967 | 973 |
| 06C4 | PK 16.865 (B) | 955 | 961 |
| 091C | São João | 966 | |

Apesar das várias tentativas, e como foi demonstrado anteriormente, é reforçado que o que causa mais interferência na Linha de Cascais é o UMTS. Nas Figuras 4.21 a 4.26 segue a comparação do *RxQual* medido com os *RxQuals* para a interferência *Inter* e *Intra Network* antes e depois da alteração de frequências.

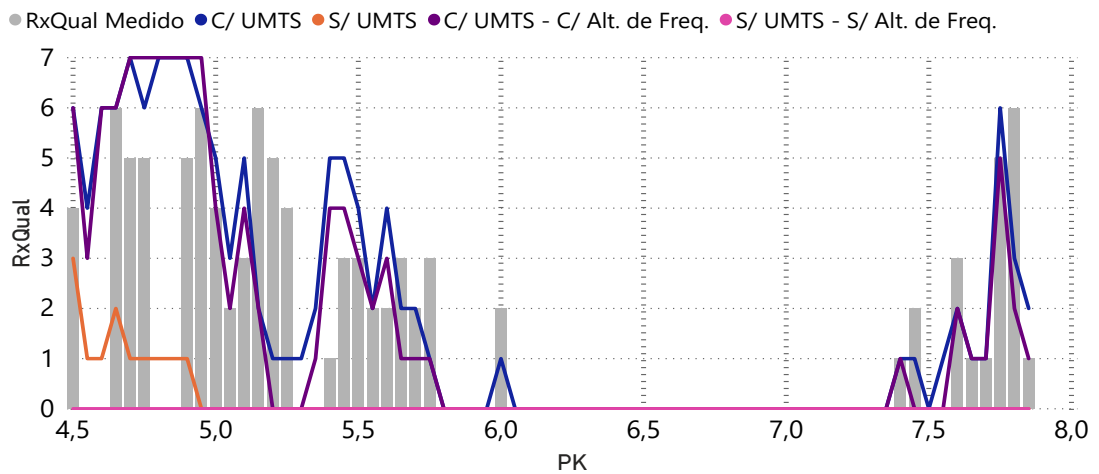


(a) Portadora = 955.

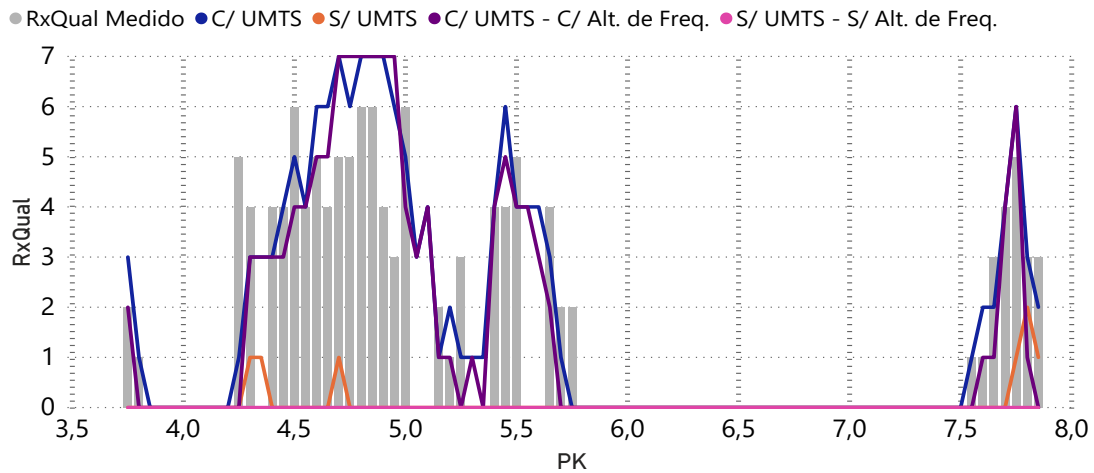


(b) Portadora = 961.

Figura 4.21: Comparação de RxQual para o site de Alcântara com alteração de frequências.

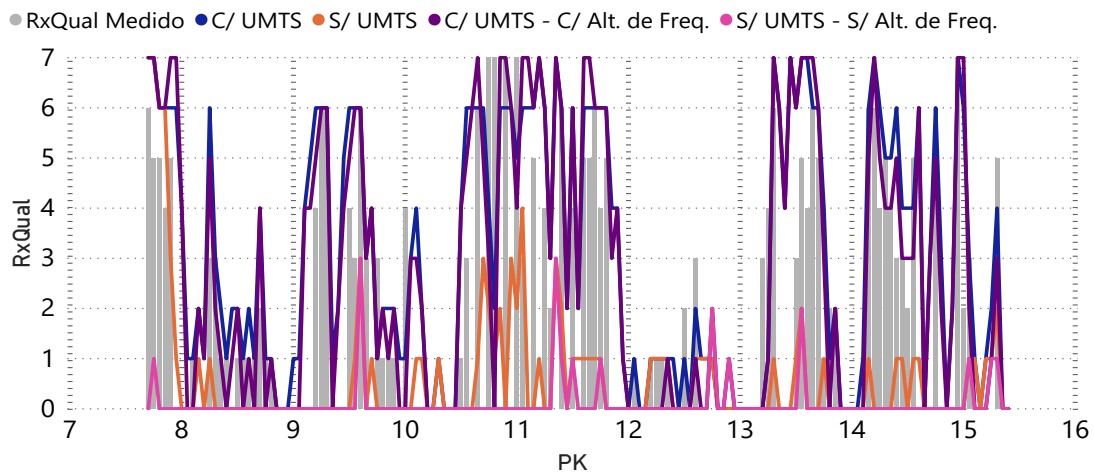


(a) Portadora = 959 -> 965 (Nova Frequência).



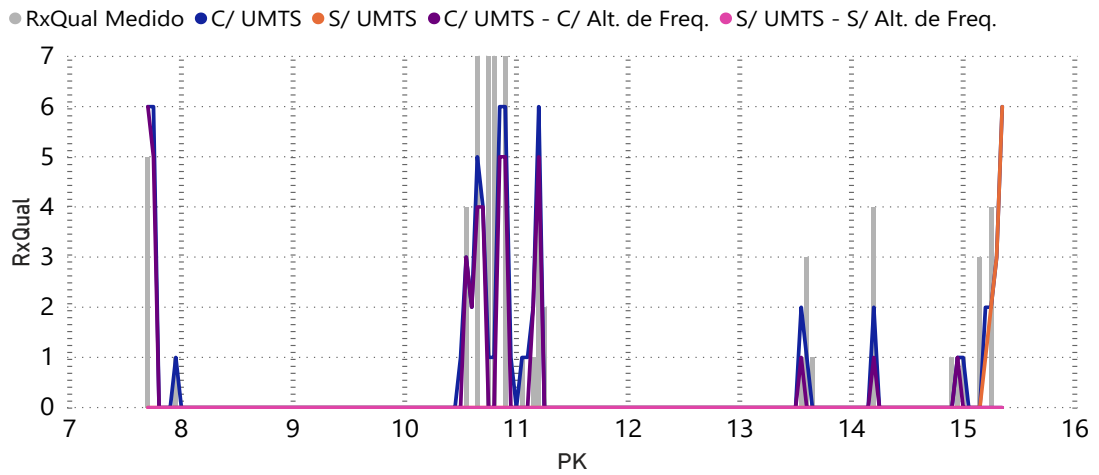
(b) Portadora = 959 -> 970 (Nova Frequência).

Figura 4.22: Comparação de RxQual para o site de Pedrouços com alteração de frequências.



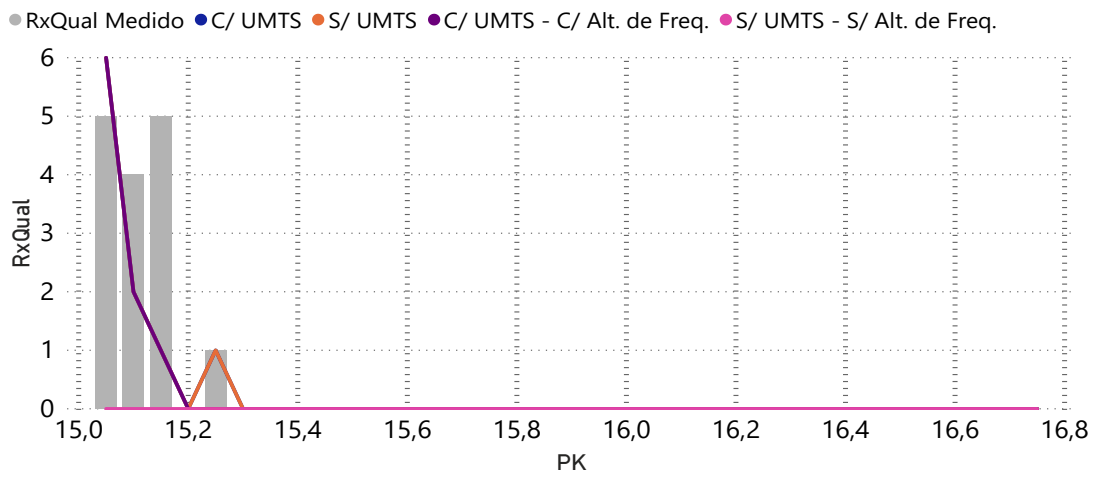
(a) Portadora = 963 -> 957 (Nova Frequência).

4. CASO DE ESTUDO



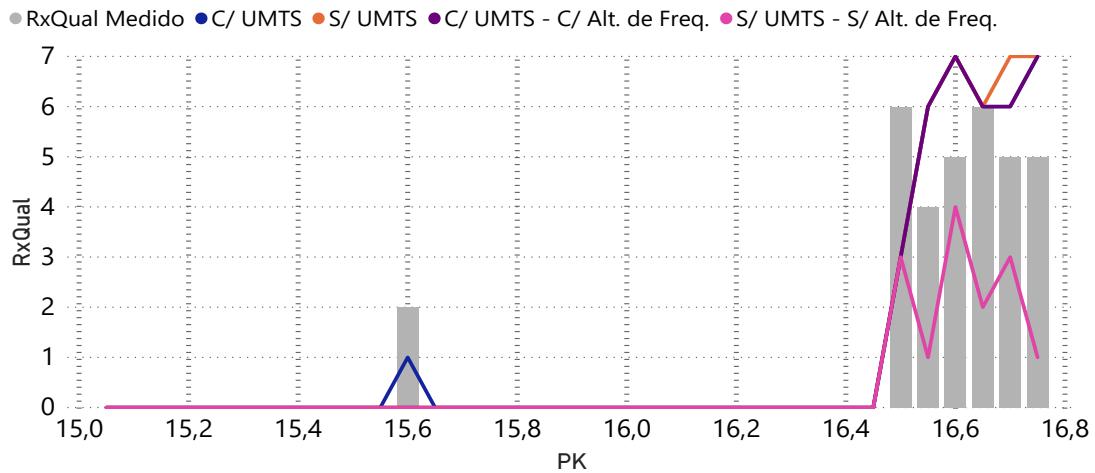
(b) Portadora = 969 -> 961 (Nova Frequência).

Figura 4.23: Comparação de RxQual para o site de Paço de Arcos com alteração de frequências.



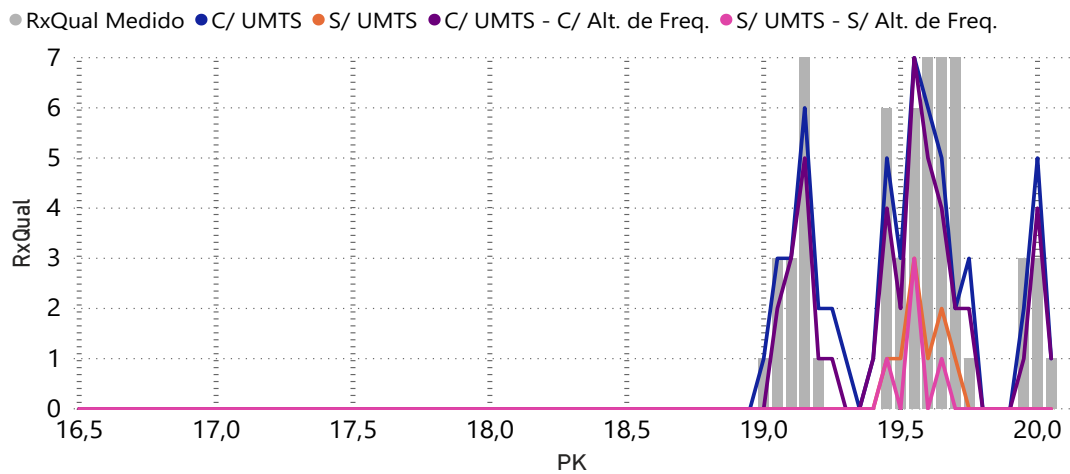
(a) Portadora = 967.

4. CASO DE ESTUDO

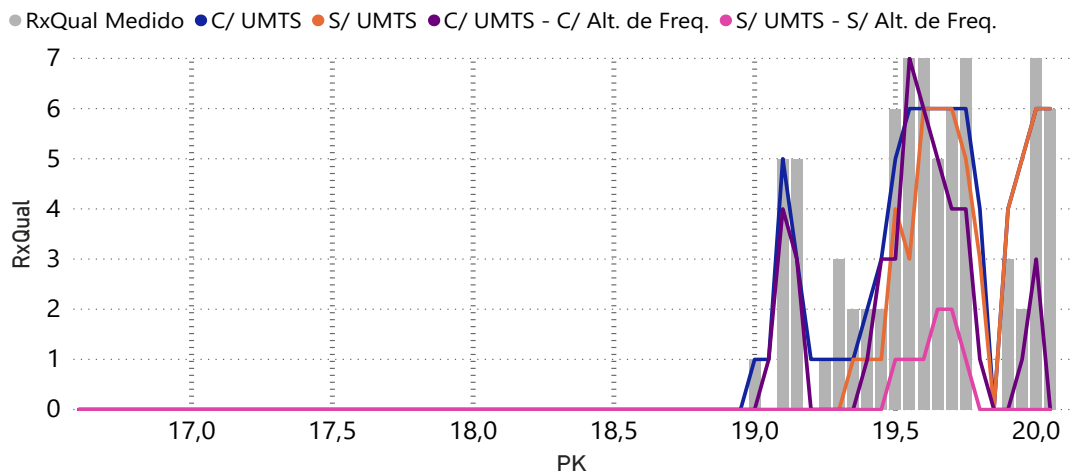


(b) Portadora = 973.

Figura 4.24: Comparação de RxQual para o site de PK16+865 A com alteração de frequências.



(a) Portadora = 955.



(b) Portadora = 961.

Figura 4.25: Comparação de RxQual para o site de PK16+865 B com alteração de frequências.

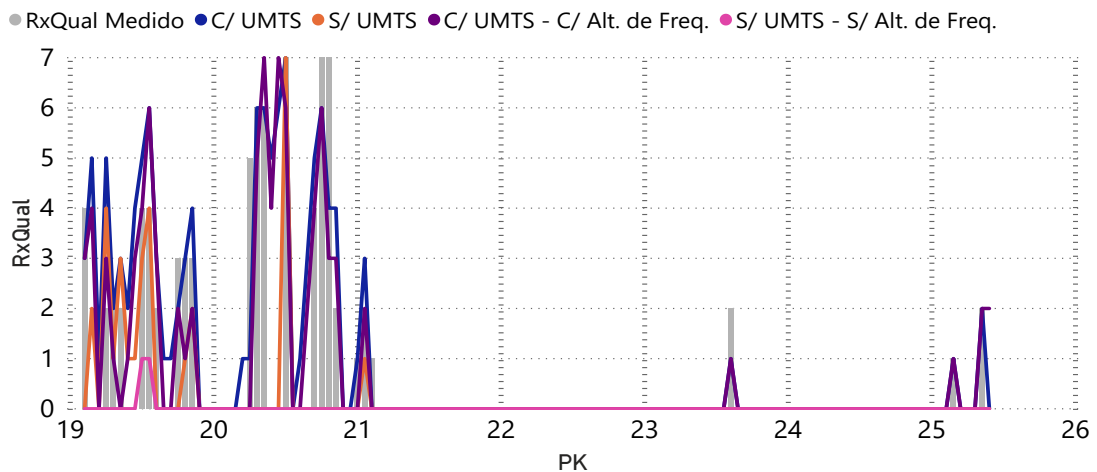


Figura 4.26: Comparação de RxQual para o site de São João com alteração de frequências (Portadora = 959 -> 966 (Nova Frequência)).

Assim sendo, uma das principais medidas será mesmo a localização das estações base, sendo fundamental a co-localização das estações base GSM-R, junto dos sites do UMTS. Outra solução passa pela utilização de outro tipo de filtros na rede UMTS com o intuito de reduzir as emissões OBE ou mesmo no GSM-R de forma a melhorar a seletividade.

5

Conclusões

Neste capítulo é apresentado um sumário de todo o trabalho realizado durante a elaboração desta dissertação. Também são enunciados, de forma resumida, todos os resultados obtidos, assim como algumas propostas possíveis de trabalho a ser implementado, dando seguimento ao estudo presente nesta dissertação.

5.1 Trabalho Desenvolvido

Esta dissertação tinha como principal objetivo medir o impacto que as redes móveis dos operadores públicos (UMTS, LTE e 5G NR) têm face às redes utilizadas pelos operadores ferroviários (GSM-R). Face à situação de pandemia mundial vivida durante a elaboração desta dissertação, apenas foi possível apresentar resultados práticos para a rede UMTS.

Antes de se desenvolver a implementação de qualquer algoritmo, numa primeira fase, tiveram de ser caracterizados todos os parâmetros necessários para o cálculo da interferência, tais como o ACS, o ACLR e por fim o ACIR.

Para o cálculo da interferência, foi utilizado um conjunto de amostras relativas a medidas realizadas na Linha de Cascais, depois de devidamente processadas e validadas. Estas medidas são indispensáveis para a realização deste trabalho, pois além de servirem para ter o sinal proveniente do UMTS e do GSM-R, na linha férrea, desempenham um papel fundamental na validação de todos os cálculos teóricos realizados.

Uma vez implementado o algoritmo, procedeu-se a vários testes de modo a atingir o objetivo principal desta dissertação.

É importante referir que cenário descrito no estudo realizado na Linha de Cascais teve um enquadramento meramente académico, tendo por base medições preliminares, num linha em funcionamento piloto, ainda sem exploração GSM-R, e que a configuração apresentada neste trabalho não corresponde à configuração final da rede atual em operação, tendo a Infraestruturas de Portugal operacionalizado uma rede onde foram implementadas as medidas necessárias para minorar os efeitos das interferências e garantir uma rede com QoS exigido pelas normas técnicas do GSM-R. Além disso, de acordo com EIRENE, para radiocomunicações vocais, o nível de sinal da linha de Cascais cumpre com as especificações e que, para futuro suporte do ETCS N2, estão previstos a instalação de novos sites que irão reforçar ainda mais o nível de cobertura e por conseguinte a qualidade e a resiliência da rede GSM-R nesta linha.

5.2 Resultados

Antes de qualquer implementação, foi demonstrado através da análise de parâmetros teóricos, que a ligação que mais prejudica o GSM-R, tanto por parte dele próprio como pelas redes móveis dos outros operadores é a ligação em *downlink*. Ainda foi analisado qual das três redes (UMTS, LTE e 5G NR) era a mais desfavorável para uma coexistência com o GSM-R e chegou-se à conclusão de que dependeria dos desvios entre portadoras, sendo que, para desvios superiores a 2,8 MHz seriam praticamente iguais, e que para desvios inferiores a 2,8 MHz o UMTS seria o mais adverso em quase todo o seu domínio (de 0 a 2,8 MHz). É de salientar que estas últimas conclusões foram retiradas para as mesmas condições, tanto a nível de sinal como de largura de banda utilizada.

A aplicabilidade do algoritmo desenvolvido na predição da interferência em ambientes ferroviários, foi validada através dos resultados obtidos. De forma a medir o impacto que o UMTS tem no GSM-R, foram realizados três conjuntos de testes em que os resultados de todos eles foram sempre validados com as medidas referidas anteriormente.

No primeiro teste, foi calculada a interferência *Intra Network* de modo a contabilizar apenas o impacto que o GSM-R provoca nele próprio. Assim sendo, pela análise dos resultados, foi possível identificar uma situação próxima do PK 0 (Cais do

Sodré) em que o C/I fica próximo dos 9 dB, podendo provocar chamadas caídas ou problemas de sinal nesta zona.

No segundo teste, foi calculada a interferência *Inter Network*, causada pelo UMTS no GSM-R e somada à interferência calculada no primeiro teste. Deste modo, constata-se que a interferência *Inter Network* é bastante mais prejudicial face à interferência *Intra Network*, reforçando assim que as redes dos operadores públicos causam bastantes problemas nas redes utilizadas pelos operadores ferroviários, em ambientes urbanos, como trata a presente dissertação. Assim, concluiu-se que os problemas causados pela interferência na Linha de Cascais não são provocados, na sua maioria, pelo próprio GSM-R, mas sim pelo UMTS.

Por fim, e tendo em conta os problemas descritos anteriormente, tentou-se solucionar o problema alterando as frequências do GSM-R, mas depois de vários testes chegou-se à conclusão de que por mais que se alterassem as frequências, os valores de C/I alteravam muito pouco, não sendo suficiente para mitigar os problemas existentes.

Deste modo, é demonstrado que a principal medida será mesmo a localização das estações base, sendo necessário a co-localização das estações base GSM-R, junto dos sites UMTS. Assim sendo, é ratificado uma vez mais, que a influência do UMTS é bastante acentuada face ao GSM-R. Outra forma de tentar reduzir o impacto que as redes UMTS têm nas redes GSM-R, é aumentar a potência de emissão das estações base GSM-R, mas é necessário ter em conta que esta solução pode aumentar significativamente a interferência *Intra Network* podendo provocar chamadas caídas.

5.3 Trabalho Futuro

Como trabalho futuro, são propostas duas variantes do trabalho realizado nesta dissertação.

A primeira proposta, passa por recolher novas medidas na Linha de Cascais (ambiente urbano) para as tecnologias LTE e mais tarde em 5G NR, de modo a encontrar a influência destas tecnologias no GSM-R, para confirmar o estudo teórico realizado neste trabalho. Ainda dentro da mesma proposta, também seria interessante recolher medidas, mas desta vez em outros ambientes, como o suburbano e o rural e com características morfológicas diferentes das da Linha de Cascais.

Referências

- [1] UIC, “Future railway mobile communication system,” fevereiro 2021. <https://uic.org/rail-system/frmcs/>.
- [2] ERTMS, “Gsm-r deployment statistics - overview,” acedida a janeiro 2021. <https://www.ertms.net/?page-id=58>.
- [3] E. C. C. E. within the European Conference of Postal and T. A. (CEPT), ECC Report 162 - Pratical Mechanism to Improve the Compatibility Between GSM-R and Public Mobile Networks and Guidance on Pratical Coordination. ECC, CEPT, May 2011.
- [4] E. C. C. E. within the European Conference of Postal and T. A. (CEPT), ECC Report 82 - Compatibility Study for UMTS Operating within the GSM 900 and GSM 1800 Frequency Bands. ECC, CEPT, May 2006.
- [5] E. C. C. E. within the European Conference of Postal and T. A. (CEPT), ECC Report 96 - Compatibility between UMTS 900/1800 ans Systems Operating in Adjacent Bands. ECC, CEPT, March 2007.
- [6] E. C. C. E. within the European Conference of Postal and T. A. (CEPT), ECC Report 40 - Compatibility Study for LTE and WiMAX Operating within the Bands 880-915 MHz / 925-960 MHz and 1710-1785 MHz / 1805-1880 MHz (900/1800 MHz bands). ECC, CEPT, November 2010.
- [7] C. B. Jorg Eberspacher, Hans-Jorg Vogel and C. Hartmann, GSM - Architecture, Protocols and Services (3. ed.). Wiley, 2009.
- [8] T. ETSI, “145 005 digital cellular telecommunications system (phase 2+); radio transsmision and reception (3gpp ts 45.005 version 12.5. 0 release 12),” Sophia Antipolis Cedex April, 2015.

- [9] F. ETSI, 3GPP TR 45.050 V9.0.0 (2009-12) Technical Specification Group GSM/EDGE, Radio Access Network; Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD). 3GPP, 2010.
- [10] M. Laperrouza, “Transferring standards: Lessons from gsm-r in the railway sector,” in 19th European Regional ITS Conference, 2008.
- [11] H. Holma and A. Toskala, WCDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications. John Wiley & Sons Ltd, third ed., 2007.
- [12] F. ETSI, 3GPP TS 25.104 (Rel-9) Base Station (BS) Radio Transmission and Reception (FDD). 3GPP, 2018.
- [13] F. ETSI, 3GPP TS 25.101 (Rel-9) User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception (FDD). 3G, 2019.
- [14] A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe, and T. Thomas, “Lte-advanced: Next generation wireless broadband technology,” IEEE wireless communications, vol. 17, no. 3, pp. 10–22, 2010.
- [15] T. Innovations, “Lte in a nutshell,” White paper, 2010.
- [16] Ericsson., Control Channel Dimensioning. Wiley Publishing, 2009.
- [17] I. T. U. (ITU-R), Recommendation ITU-R SM.329-12 Unwanted emissions in the spurious domain. September 2012.
- [18] H. Holma, A. Toskala, and T. Nakamura, 5G Technology: 3GPP New Radio. John Wiley & Sons, 2020.
- [19] F. ETSI, 5G-NR Base Station (BS) Radio Transmission and Reception (3GPP TS 38.104 version 15.2.0 Release 15). 3GPP, 2018.
- [20] F. ETSI, 5G-NR User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception Part 1: Range 1 Standalone (3GPP TS 38.101-1 version 15.3.0 Release 15). 3GPP, 2018.
- [21] E. ETSI, “301 502 v10. 2.1: Global system for mobile communications (gsm),” Harmonized EN for Base Station Equipment Covering the Essential Requirements of Article, vol. 3, 2012.
- [22] ANACOM, “Quadro nacional de atribuição de frequências qnaf,” acedida a março 2020. <https://www.anacom.pt/render.jsp?categoryId=334933>.

- [23] C. ERC, ECC Report 82, Report on a Comparison of the Minimum Coupling Loss Method, Enhanced Minimum Coupling Loss Method, and the Monte-Carlo Simulation. European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT), may 1999.
- [24] N. Cota, A. Serrador, P. Vieira, A. R. Beire, and A. Rodrigues, "On the use of okumura-hat a propagation model on railway communications," in 2013 16th international symposium on wireless personal multimedia communications (WPMC), pp. 1–5, IEEE, 2013.
- [25] F. Häggglund, "Improved power control for gsm/edge," 2005.