

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Eletrónica e Telecomunicações e**  
**de Computadores**

**Análise de desempenho**  
**do Future Railway Mobile Communications System**  
**(FRMCS)**

**Ana Beatriz Rodrigues Susano**

(Licenciada em Engenharia Eletrónica de Telecomunicações e de Computadores)

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

Orientador:

Prof. Nuno António Fraga Juliano Cota

Júri:

Presidente:

Prof. Doutor Nuno Miguel Machado Cruz

Vogal:

Prof. Doutor António João Nunes Serrador

**Outubro de 2021**



## **Agradecimentos**

Primeiramente, quero agradecer ao professor Nuno Cota todos os ensinamentos transmitidos ao longo deste trabalho, bem como ao longo de todo o percurso académico no ISEL. Sem a sua ajuda e motivação todo este processo teria sido mais difícil.

Aos meus amigos e colegas de curso, foi um orgulho fazer este caminho ao vosso lado, só consegui chegar até aqui porque o caminho não se faz sozinho, faz-se em conjunto, sem um grupo de amigos como o que encontrei a aprendizagem não teria dado tanto prazer.

Aos meus pais, só tenho a agradecer por sempre me terem incentivado a lutar pelos meus objetivos, agradeço o apoio incondicional ao longo da licenciatura e agora do mestrado. Foram a minha motivação, força e o meu ombro amigo nesta caminhada. Sou grata por poder festejar convosco cada uma das minhas conquistas.

Ao meu namorado, agradeço toda a paciência, tranquilidade e força que me transmitiu, sempre mostrando que eu seria que capaz de chegar até ao fim.

Finalmente, dedico este trabalho ao meu avô, que sempre torceu para que eu terminasse esta etapa da minha vida.



## **Resumo**

Nos últimos anos, a união internacional dos caminhos de ferro (UIC) e outras entidades competentes iniciaram os trabalhos no sentido de desenvolver uma nova norma de comunicações móveis ferroviárias, designada por Future Railway Mobile Communications System (FRMCS). Os trabalhos relativos ao FRMCS encontram-se a decorrer, sendo que o calendário prevê que apenas em 2025 sejam finalizados os diversos documentos normativos, que definem os diferentes aspetos, designadamente em termos de arquitetura, requisitos e espectro.

A presente dissertação tem como objetivo estudar os diversos aspetos relativos à aplicabilidade da tecnologia 5G ao suporte das comunicações ferroviárias (cobertura e capacidade). Existem até agora dois tipos de abordagem para a tecnologia de acesso rádio: o 4G LTE (Long Term Evolution) ou 5G NR (New Radio), ambas as tecnologias utilizam OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) e numa fase inicial estes requisitos têm que acompanhar os requisitos do GSM-R.

O trabalho desenvolvido inclui um simulador, que tem em conta as novas frequências de operação, simula um modelo de propagação que está testado empiricamente para essas bandas, com a atenuação proveniente do modelo é possível fazer cálculos de cobertura e, posteriormente, da capacidade baseada em 5G NR. Como forma de avaliar a aplicabilidade do simulador, foram utilizados dados de duas linhas ferroviárias nacionais: linha de Cascais e linha do Oeste.

Os resultados finais registados para o FRCMS, comprovam a necessidade de criar especificações mais independentes possíveis da tecnologia de suporte, aumentando a oferta comercial por parte de fornecedores e permitindo a reutilização da infraestrutura física utilizada no GSM-R, diminuindo assim custos inerentes à construção de novas torres.

## **Palavras-Chave:**

Comunicações Ferroviárias; OFDM; Planeamento; 5G NR.



## **Abstract**

In recent years, the International Railway Union (UIC) and other competent bodies have started work on developing a new standard for mobile railway communications, known as the Future Railway Mobile Communications System (FRMCS). Work on the FRMCS is underway, and the timetable foresees that only in 2025 will the various normative documents be finalized, which define the different aspects, namely in terms of architecture, requirements, and spectrum.

This dissertation aims to study the various aspects related to the applicability of 5G technology to support railway communications (coverage and capacity). So far, there are two types of approach to radio access technology: 4G LTE (Long Term Evolution) or 5G NR (New Radio), both technologies use OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) and at an early stage these requirements must keep pace with GSM-R requirements.

The work developed includes a simulator, which considers the new operating frequencies, simulates a propagation model that is empirically tested for these bands, and the attenuation coming from the model is possible to make calculations of coverage and, later, of capacity based in 5G NR. To assess the applicability of the simulator, data from two national railway lines were used: the Cascais line and the Oeste line.

The results recorded for the FRCMS prove the need to create specifications that are as independent as possible from the supporting technology, increasing the commercial offer of suppliers and allowing the reuse of the physical infrastructure used in GSM-R, thus reducing the costs inherent to construction of new towers.

## **Keywords:**

Railway Communications; OFDM; Planning; 5G NR.



# Índice

1	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento .....	1
1.2	Motivação .....	2
1.3	Objetivos .....	2
1.4	Estrutura do Trabalho .....	2
2	Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) .....	5
2.1	Introdução.....	5
2.2	Visão Global das Comunicações Ferroviárias .....	5
2.2.1	Espectro e Qualidade de Serviço em GSM-R.....	6
2.2.2	Arquitetura GSM-R .....	8
2.2.3	Características das Comunicações Ferroviárias .....	8
2.3	A tecnologia FRMCS .....	10
2.3.1	Requisitos ao nível do utilizador (URS).....	13
2.3.2	Requisitos Funcionais (FRS)/Arquitetura do sistema FRMCS .....	15
2.3.3	Necessidades a nível Espetral.....	16
2.4	Conceitos Gerais do 5G NR .....	18
2.4.1	Camada Física .....	20
2.4.2	Arquitetura FRMCS: LTE e 5G NR .....	25
3	Planeamento em FRMCS.....	29
3.1	Introdução.....	29
3.2	Interface Rádio FRMCS .....	29
3.2.1	Parâmetros do sistema.....	29
3.2.2	Reutilização de frequências.....	32
3.2.3	Ritmos de Transmissão durante e após migração GSM-R para FRMCS	
	33	
3.3	Parâmetros Técnicos do FRMCS .....	36
3.4	Dimensionamento da Ligação Ascendente (UL).....	38
3.4.1	Sensibilidade da Estação Base FRMCS .....	38
3.4.2	Atenuação segundo o modelo IEEE 802.16 SUI.....	39

3.5	Dimensionamento da Ligação Descendente (DL).....	42
3.6	Dimensionamento de Capacidade.....	43
3.6.1	Impacto da velocidade do Comboio na SNR .....	43
3.6.2	Cálculo da SNR .....	44
3.6.3	Cálculo do Ritmo de Transmissão em 5G NR.....	45
4	Casos de Estudo .....	49
4.1	Introdução.....	49
4.2	Descrição do problema/Fluxograma .....	49
4.3	Cenários de Estudo .....	50
4.4	Calibração do modelo IEEE 802.16 SUI Model .....	52
4.5	Simulação de Cobertura .....	52
4.5.1	Potência Recebida .....	52
4.5.2	Simulação da Relação Sinal-Ruído .....	57
4.6	Simulação de capacidade.....	58
5	Conclusões.....	63
5.1	Trabalho Desenvolvido .....	63
5.2	Conclusões Finais .....	64
5.3	Trabalhos Futuros .....	65
	Referências .....	67
	Anexo A.....	71

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Alocação de frequências em GSM-R (retirado de [3]).....	7
Figura 2.2 – Arquitetura do GSM-R. ....	8
Figura 2.3 – Requisitos e objetivos do FRMCS (baseado em [8]).....	10
Figura 2.4 – Organização dos requisitos técnicos do FRMCS.....	11
Figura 2.5 – Benefícios da aplicação do 5G aos processos ferroviários.....	14
Figura 2.6 – Arquitetura do sistema FRMCS (baseado em [11]). ....	15
Figura 2.7 – Componentes de um canal de comunicação rádio em 5G NR.....	21
Figura 2.8 – Estrutura de uma Trama e Subtrama 5G NR em 3GPP. ....	24
Figura 2.9 – Arquitetura das redes 5G NR face ao LTE (retirado de [16]).....	26
Figura 2.10 – Arquitetura do FRMCS fase de migração [17]. ....	27
Figura 3.1 – Equipamento na Estação Base e no UE (retirado de [19]). ....	30
Figura 3.2 – Estrutura da Trama FRMCS.....	30
Figura 3.3 – Arquitetura celular em FRMCS. ....	31
Figura 3.4 – Distribuição do sinal e das células interferentes em FRMCS. ....	33
Figura 3.5 – Qualidade do sinal em função da velocidade de deslocação do móvel [24]. .....	44
Figura 3.6 – Extrapolação da [%] de pico do ritmo de transmissão baseada nas curvas da Figura 3.5.....	44
Figura 4.1 – Fluxograma de simulação. ....	49
Figura 4.2 –Linha ferroviária de Cascais. ....	50
Figura 4.3 –Linha ferroviária do Oeste. ....	51
Figura 4.4 – Atenuação no PK 17 setor A e B. ....	52
Figura 4.5 – Potência Recebida ao longo da linha de Cascais para $f=1900\text{MHz}$ . ....	53
Figura 4.6 - Potência recebida ao longo da Linha do Oeste para $f=1900\text{MHz}$ . ....	54
Figura 4.7 – Histograma de Best Server da linha de Cascais. ....	55
Figura 4.8 – Potência recebida dos Best Server da linha de Cascais. ....	55
Figura 4.9 – Histograma de Best Server da Linha do Oeste. ....	56
Figura 4.10 – Potência recebida dos Best Server da linha do Oeste. ....	56
Figura 4.11 – Relação Sinal-Ruido para $f=1900\text{MHz}$ ao longo da linha de Cascais. ....	57

Figura 4.12 – Relação sinal-ruído para $f=1900\text{MHz}$ ao longo da linha do Oeste. ....	57
Figura 4.13 – Ritmo de transmissão por RB para $v=3\text{km/h}$ e $v=120\text{km/h}$ da Linha de Cascais. ....	58
Figura 4.14 – Ritmo de transmissão por RB para $v=3\text{km/h}$ e $v=120\text{km/h}$ da Linha do Oeste. ....	59
Figura 4.15 – Ritmo de transmissão por RB para $v=350\text{km/h}$ e $v=500\text{km/h}$ da Linha do Oeste. ....	59
Figura 4.16 – Ritmo de transmissão em função da distância entre o Outeiro e Camarão. ....	61
Figura 4.17 – Troço entre Outeiro e Camarão.....	61

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Valores mínimos de cobertura em GSM-R [6].	7
Tabela 2.2 – Sumário das necessidades a nível espectral e possíveis soluções (baseado em [12]).	17
Tabela 2.3 – Agrupamento de frequências em 5G NR [13].	20
Tabela 2.4 – Bandas de operação 5G NR [13].	21
Tabela 2.5 – Parâmetros de simulação [13].	23
Tabela 2.6 – Número de RBs por largura de banda do canal de transmissão.	24
Tabela 2.7 – Número máximo de NR RB para cada numerologia.	25
Tabela 3.1 – Características dos três cenários considerados [19].	32
Tabela 3.2 – Tráfego durante a fase de migração por área [12].	34
Tabela 3.3 – Tráfego pós migração por segmento [12].	35
Tabela 3.4 – Parâmetros da Estação Base FRMCS [19].	36
Tabela 3.5 – Parâmetros do Móvel FRMCS [19].	37
Tabela 3.6 – Parâmetros de simulação retirados de [23].	40
Tabela 3.7 – Link Budget da ligação ascendente.	41
Tabela 3.8 – Link Budget da ligação ascendente.	42
Tabela 3.9 – SNR mínima para cada modulação [16].	45
Tabela 3.10 – Cálculo da Capacidade em bandas inferiores a 1 GHz e superiores a 2.5 GHz).	46



## Lista de acrónimos

<b>5G NR</b>	Fifth Generation New Radio
<b>AuC</b>	Authentication Center
<b>ATO</b>	Automatic Train Operations
<b>BSC</b>	Base Station Controller
<b>BSS</b>	Base Station Sub-system
<b>BTS</b>	Base Transceiver Station
<b>CEPT</b>	European Frequency Committee
<b>COTS</b>	Commercial off The Shelf
<b>C-DAS</b>	Connected Driver Advisory System
<b>DMI</b>	Driver Machine Interface
<b>EIR</b>	Equipment Identity Register
<b>EIRENE</b>	European Integrated Radio Enhanced Network
<b>EC</b>	European Commission
<b>ERA</b>	European Union Agency for Railways
<b>ERTMS</b>	European Rail Traffic Management System
<b>ETCS</b>	European Train Control System
<b>ETSI</b>	European Telecommunications Standards Institute
<b>E-GSM</b>	Extended - Global System for Mobile Communications
<b>FRMCS</b>	Future Railway Mobile Communications System
<b>FRS</b>	Functional Requirements Specifications
<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communications
<b>GSM-R</b>	Global System for Mobile Communications - Railway
<b>HLR</b>	Home Location Register

<b>HMI</b>	Human-Machine Interface
<b>IM</b>	Infrastructure Manager
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output
<b>MORANE</b>	MOBILE Radio for RAILway Networks in Europe
<b>MS</b>	Mobile Station
<b>MSC</b>	Mobile Switching Centre
<b>NSS</b>	Network Sub-System
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>P-GSM</b>	Primary - Global System for Mobile Communications
<b>PK</b>	Ponto quilométrico
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>RB</b>	Resource Block
<b>RT</b>	Rail Telecommunication
<b>RU</b>	Railway Undertaking
<b>SIM</b>	Subscriber Identity Module
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>TETRA</b>	Terrestrial Trunked Radio
<b>TSI</b>	Technical Specifications for Interoperability
<b>UIC</b>	Union Internationale des Chemins de Fer
<b>URS</b>	User Requirements Specifications
<b>VLR</b>	Visitor Location Register

## Lista de Símbolos

$A$	Parâmetro A
$BW_{RB}^{\mu}$	Largura De Banda Ocupada
$CHBW$	Largura De Banda Do Canal Máxima
$\Delta f$	Espaçamento entre subportadoras (SCS)
$\Delta f^{\mu}$	Espaçamento Entre Subportadoras Por Numerologia
$d$	Distância à Estação Base
$d_0$	Distância de 100 metros
$f$	Fator de escalamento
$h_b$	Altura da Estação-Base
$j$	Portadora para a qual está a ser calculado o débito binário
$L_p$	Atenuação de Propagação
$MinGBW$	Largura de banda de guarda mínima
$N_F$	Figura De Ruído Do Recetor
$N_{RB}$	Densidade De Ruído Térmico Por RB
$N_T$	Densidade De Ruído Térmico
$N_{PRB}^{BW(j),\mu}$	Número máximo de RB alocados à banda e à numerologia
$OH$	Overhead.
$Q_m$	Número de bits por símbolo
$R_{max}$	Débito máximo da FTT
$RB_{Max}^{\mu}$	Débito Binário Máximo Por Numerologia
$SINR$	Relação Sinal-Ruído
$S_{UE}$	Sensibilidade do Móvel
$S_{gNB}$	Sensibilidade da Estação Base

$T_s^\mu$	Duração média de um símbolo na <i>subtrama</i>
$\nu_{layer}$	Número de camadas MIMO
$\lambda$	Comprimento de Onda
$\gamma$	Expoente de Atenuação
$\mu$	Numerologia

# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento

Para que haja harmonização global do sistema ferroviário mundial um dos primeiros passos é a harmonização das ferrovias a nível Europeu. Este é um passo importante para melhoria da infraestrutura existente e que tem como principal objetivo atingir a interoperabilidade entre sistemas.

O sistema ferroviário europeu utiliza como tecnologia de transmissão rádio o GSM-R, *Global System for Mobile Communications – Railway*, no entanto este é combinado com o GPRS. Este último permite melhorar a eficácia nas operações e oferecer novos serviços ao utilizador uma vez que é a base da inteligência no transporte dos dados deste sistema. O ERTMS (*European Rail Traffic Management System*) é o sistema de gestão que combina o ETCS (*European Train Control System*) com o GSM-R. Este foi desenhado para terminar com as incompatibilidades entre os sistemas existentes na Europa e foi o sistema que ofereceu mais vantagens ao nível dos custos de manutenção, segurança, resiliência, pontualidade e capacidade de tráfego [1].

A UIC (*Union Internationale des Chemins de Fer*) em cooperação com a ERA (*European Union Agency for Railways*) lançou como tema a necessidade de oferecer novos serviços e aumentar o potencial dos já existentes visto que, tal não seria possível com GPRS.

O 3GPP (quem define os padrões nos sistemas ferroviários) propôs o estudo de um novo tópico sobre FRMCS (*Future Railway Communications System*) e o comité técnico para as telecomunicações ferroviárias do ETSI, começou os trabalhos na nova geração de tecnologia rádio para ferrovias [1].

O espectro é um dos principais objetivos desta nova tecnologia devido à necessidade de inclusão de novas frequências a operar na ordem dos GHz. Outra questão de interesse, a nível europeu, depreende-se com o investimento que será necessário para a instalação de novos sites cuja instalação de origem era o GSM-R.

O processo de normalização desta nova tecnologia está a cargo do Comité Técnico do ETSI (TC) e da RT (*Rail Telecommunications*) que em conjunto formam a TC RT. Esta trabalha em cooperação com a TC ITS na investigação da utilização partilhada da banda dos 5GHz em ferrovias urbanas [1].

## **1.2 Motivação**

Os trabalhos relativos ao FRMCS encontram-se a decorrer, sendo que o esperado é que apenas em 2025 sejam finalizados os diversos documentos normativos, que definem os diferentes aspetos, designadamente em termos de arquitetura, requisitos e espetro. Este último foi um dos aspetos que motivou este trabalho, é um dos aspetos que neste momento suscita maior apreensão, dada a necessidade absoluta de criação de faixas de frequência exclusivas para a ferrovia, mitigando igualmente os efeitos da interferência de redes públicas.

Um dos princípios definido para o FRMCS é a necessidade de criar especificações o mais independente possível da tecnologia de suporte, permitindo a adoção de sistemas utilizados pelas redes públicas, diminuindo assim custos e aumentando a oferta comercial por parte de fornecedores. Assim, diversas tecnologias assumem desde já a possibilidade de ser adotadas, designadamente o LTE (Long Term Evolution) e, claro, a tecnologia 5G. A motivação para esta dissertação é estudar os diversos aspetos relativos à aplicabilidade da tecnologia 5G ao suporte das comunicações ferroviárias, tendo em conta alguns dos resultados que atualmente são possíveis de obter através de projetos em curso que estudam a aplicação do 5G à mobilidade rodoviária.

## **1.3 Objetivos**

O principal objetivo desta dissertação será avaliar a aplicabilidade da tecnologia 5G para utilização como tecnologia de acesso rádio do FRMCS. Esta avaliação terá em conta as principais características rádio da tecnologia 5G, sendo objetivo avaliar igualmente o impacto em termos do número de estações base, quando comparado com o GSM-R, para garantir a cobertura de um cenário ferroviário real

## **1.4 Estrutura do Trabalho**

Esta dissertação é composta por cinco capítulos: o capítulo 1 é um capítulo de enquadramento e introdutório, seguidamente o capítulo 2 aborda as principais características da propagação em ambiente ferroviário, introduz as características do sistema atualmente implementado na ferrovia portuguesa (GSM-R) e o seu enquadramento a nível europeu. Ainda dentro do segundo capítulo é apresentado o estado da arte do FRMCS, este capítulo contém um resumo das principais características do novo sistema de acesso rádio, os requisitos quer a nível do utilizador quer ao nível da arquitetura e os requisitos a nível espectral.

O capítulo 3 aborda o planeamento de cobertura e de capacidade em FRMCS, sendo que são apresentadas as linhas orientadoras para os dimensionamentos envolvidos. Neste capítulo é ainda apresentado o modelo de propagação considerado dadas as características do novo sistema.

No capítulo 4 são apresentados os dois cenários de estudo, os testes de calibração do modelo de propagação e também os testes de validação da ferramenta de simulação.

Por último, o Capítulo 5 apresenta o resumo do trabalho realizado, as conclusões retiradas do mesmo e as propostas de trabalho futuro.



## 2 Future Railway Mobile Communication System (FRMCS)

### 2.1 Introdução

O GSM-R é a tecnologia de comunicações móveis que opera diariamente em mais de 100 000 quilómetros de ferrovia e é, atualmente, o sistema de comunicações ferroviárias utilizado na Europa e no mundo. No entanto, as necessidades inerentes à ferrovia estão em constante mudança e com o passar dos anos o GSM-R aproxima-se da obsolescência (prevê-se que a sua manutenção só será garantida até 2030). Posto isto, as organizações membros da UIC iniciaram em 2010 a discussão a cerca do sucessor do GSM-R e, finalmente, em 2014 foi lançado pela UIC o tema do Future Railway Mobile Communication System (FRMCS).

A transição entre as tecnologias GSM-R e FRMCS contemplará uma fase de coexistência entre os sistemas até que seja verificada a possibilidade do FRMCS operar individualmente.

Neste capítulo serão apresentadas as principais características e requisitos dos sistemas de comunicações ferroviários, bem como as tecnologias FRMCS.

### 2.2 Visão Global das Comunicações Ferroviárias

Em 1997, a UIC lançou o MoU (Memorandum of Understanding) para que as ferrovias europeias que assinassem este memorando tivessem acesso a um investimento na implementação do GSM-R em detrimento dos anteriores sistemas analógicos. Adicionalmente, a UIC propôs um Aol (Agreement of Implementation) onde as ferrovias que o assinassem se comprometiam a iniciar a instalação do GSM-R, pelo menos até 2003. Seguidamente, tendo em conta as TSI (Technical Specifications for Interoperability) e as diretivas europeias de interoperabilidade, nasceu o sistema GSM-R gerido pela ERA (European Railway Agency). Este baseia-se na tecnologia GSM, segue todos os requisitos definidos no projeto EIRENE/MORANE e foi adotado como sistema standard para dar suporte operacional às comunicações de voz e dados. O GSM-R veio por isso, modernizar as comunicações ferroviárias, permitindo a migração da anterior tecnologia analógica para digital e o seu lançamento veio especificar os requisitos necessários para garantir a interoperabilidade entre sistemas [1].

O ETCS é o sistema de controlo promovido e desenvolvido, pela comissão europeia, para ser utilizado em conformidade com as diretivas de alta velocidade e de interoperabilidade [2]. Este sistema veio ajudar a ultrapassar as dificuldades/ os obstáculos inerentes à gestão e controlo da sinalização e do tráfego ferroviário

internacional. A unificação dos sistemas de sinalização tornou os serviços de transporte de passageiros interoperáveis, trouxe maior competitividade ao mercado ferroviários, levando à redução de custos e aumentando a qualidade global na resposta à procura dos transportes ferroviários [2].

O ETCS é formado pela sinalização local e de cabine, e permite transmissão de dados para o comboio. A sinalização local consiste na instalação de equipamentos ao longo dos caminhos de ferro aos quais se dá o nome de balizas de sinalização e na colocação de equipamentos de controlo nas cabines dos comboios, como por exemplo, DMI (Driver Machine Interface). Os ecrãs de manobras colocados nas cabines permitem comunicar aos maquinistas todas as manobras e informações de tráfego na linha férrea, desta forma é possível assegurar uma melhor monitorização das ações do condutor e garantir que todos os comboios operam em segurança [2].

O ETCS dispõe de quatro níveis de sinalização:

- **Nível 0:** destinado a locomotivas ou outro material circulante que não interaja com equipamentos da linha;
- **Nível 1:** Transmissão de dados entre os caminhos de ferro e o maquinista e vice-versa, nomeadamente, a informação difundida pelas balizas instaladas ao longo das linhas férreas;
- **Nível 2:** Idêntico ao nível 1, mas com a adição do GSM-R (para transmissão de posicionamento e dados) que permitem ao maquinista visualizar toda a informação sobre a integridade e localização dos comboios na linha;
- **Nível 3:** Idêntico ao nível 2, mas a localização do comboio deixa de ser feita com base em circuitos e contadores de eixos montados nos caminhos de ferro passa a ser feita através de sistema de posicionamento geográfico como é o caso do GPS.

### 2.2.1 Espectro e Qualidade de Serviço em GSM-R

No GSM-R deu-se preferência a requisitos mais específicos para além das comunicações de voz e dados entre terra e comboio, dos quais se destacam: as comunicações ferroviárias para fins de emergência, chamadas de voz em modo *broadcast*, chamadas de voz em grupo e comunicação com uma estação de controlo que permite definir prioridades e preferência. Tendo em conta essas aplicações o ETSI definiu um intervalo de frequências para o GSM-R, como se ilustra na Figura 2.1.

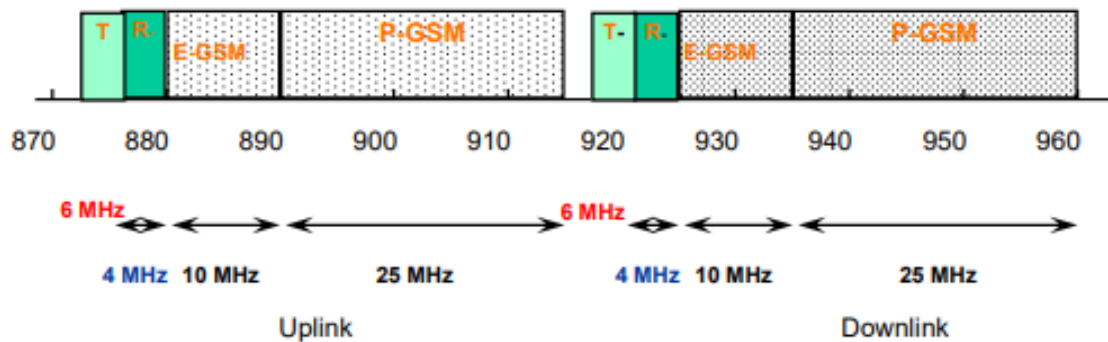


Figura 2.1 – Alocação de frequências em GSM-R (retirado de [3]).

Na Figura 2.1, pode observar-se a distribuição de frequências em GSM sendo que, os intervalos de 880 a 915 MHz e 925 a 960 MHz pertencem ao GSM estendido (E-GSM) e os intervalos de 890 a 915 MHz e 935 a 960 MHz pertencem ao GSM primário (P-GSM). Os 4 MHz disponíveis em GSM-R estão divididos em duas bandas: uma opera entre os 876 MHz e os 880 MHz (*uplink*) e a outra opera na faixa de frequência dos 921 MHz aos 925 MHz (*downlink*), em cada uma das bandas estão alocados 19 canais de comunicação, com 200 kHz de largura de banda [4] [5].

A qualidade de serviço do GSM-R é medida tendo por base cada 100 metros (intervalo de localização na linha ferroviária) e a probabilidade de cobertura ideal é de 95%. O GSM-R não pode ter limitações ao nível de sinal recebido nas antenas dos comboios e a gestão dos *handover* deve ser planeada com rigor, estes são dois dos principais objetos de estudo do sistema. Assim sendo existe níveis mínimos de sinal recebido estando estes resumidos na Tabela 2.1 para os níveis ETCS anteriormente abordados.

Tabela 2.1 – Valores mínimos de cobertura em GSM-R [6].

Tipo	Potência mínimo [dBm]	Aplicação	Velocidade do Comboio
Obrigatório	-98	Voz e informações de segurança reduzida	-
Obrigatório	-95	ETCS níveis 2/3	≤ 220 km/h
Recomendado	-92	ETCS níveis 2/3	≥ 280 km/h

Na Tabela 2.1 pode ver-se que é necessário garantir um nível mínimo de sinal não inferior a -98 dBm para as aplicações básicas de sinalização, mas quando as aplicações carecem de requisitos de sinalização mais elevados (ETCS nível 2 e 3) o nível de sinal

mínimo é de -92 dBm. Os tempos para estabelecimento de chamadas variam entre 5 e 7.5 segundos, para 95% e 100% das chamadas, respetivamente, no entanto se a chamada for de emergência esse valor deve ser inferior a 2 segundos [5] [6].

O estudo do *handover* em GSM-R é fulcral, este requer uma taxa de sucesso de 99% uma vez que, devido à possibilidade de aplicar o sistema a comboios de alta velocidade, estes podem atingir uma velocidade máxima no recetor de 500 km/h [5].

### 2.2.2 Arquitetura GSM-R

A arquitetura GSM-R é baseada na arquitetura do GSM e rege-se por sistemas de controlo baseados nas normas da ETCS. Esta arquitetura foi pensada para que os controladores de qualquer ferrovia sejam interoperáveis com outros internacionalmente, de forma a suportar comunicação de voz e funções operacionais (telemetria e monitorização de localização). A arquitetura encontra-se ilustrada na Figura 2.2:

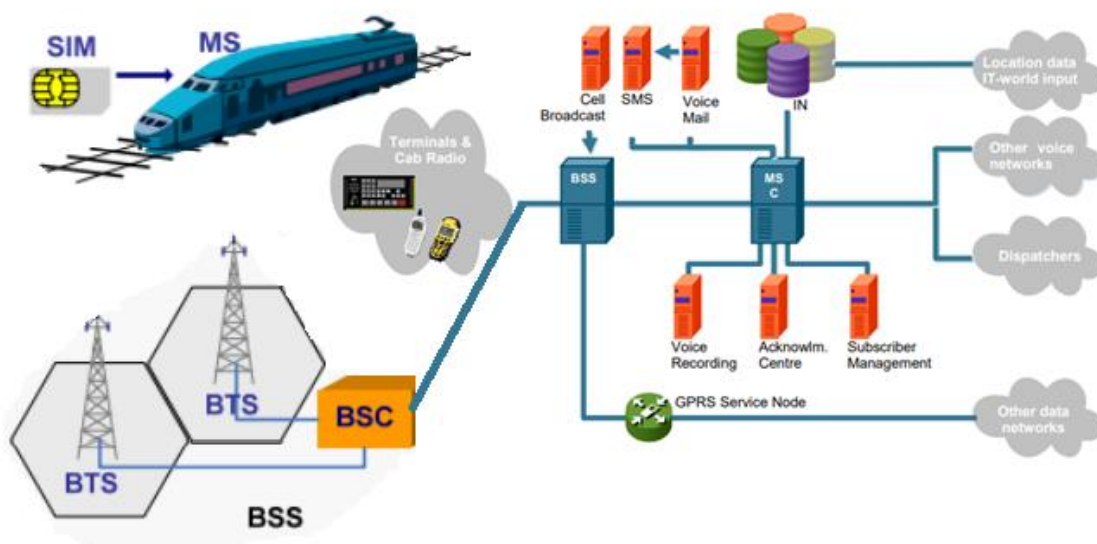


Figura 2.2 – Arquitetura do GSM-R.

### 2.2.3 Características das Comunicações Ferroviárias

A propagação em ferrovias tem características distintas da propagação noutros tipos de ambientes. Neste tipo de ambientes de comunicação o estudo da predição de cobertura é feito para propagação em linha reta e não radial o que, por vezes, facilita a estimação de cobertura pois as estações base estão distribuídas ao longo das linhas férreas.

Em [7] encontra-se a descrição de vários equipamentos que têm capacidade de estabelecer comunicação entre os postos de operação e os comboios, no entanto, muitas das vezes, são equipamentos que precisam de ser operados pelo Homem

(Maquinistas, operadores de comando, entre outros). Os controladores (*dispatcher*) e os equipamentos cabine (rádios, *racks*, etc.) são exemplo disso, estão instalados nas cabines dos comboios e permitem criar a interface Homem/máquina. As linhas ferroviárias encontram-se divididas por zonas, cada controlador tem a capacidade de contactar um comboio que esteja na sua área de abrangência, mas para tal acontecer, é necessário existir uma delimitação fiável e correta das diferentes zonas. As comunicações através dos controladores permitem o envio de mensagens, a realização de diferentes chamadas: individuais/grupo, por zona ou chamadas de emergência [7].

Com o passar dos anos a sinalização foi sendo desenvolvida numa tentativa de fazer um melhor aproveitamento da ocupação das ferrovias e uma melhor gestão da circulação dos comboios. No entanto, se os requisitos de sinalização da ETCS falharem pode haver necessidade de efetuar travagens de emergência, estas travagens têm que ser comunicadas a todos os comboios que efetuam percursos na mesma linha ou que se cruzem com ela. Assim sendo as chamadas entre comboios, a comunicação da posição dos diferentes comboios e o rápido estabelecimento de chamadas são fatores de peso na circulação ferroviária.

O FRMCS, como potencial sucessor do GSM-R, deverá prever a utilização de diversos equipamentos terminais que possam ser utilizados nas ferrovias. Deverá suportar os requisitos do ETCS, abordado na subsecção 2.1, pois é o sistema que complementa/substitui (dependendo do nível), a sinalização das vias ferroviárias e indica as condições da linha (em determinadas circunstâncias levará a que o comboio sofra uma paragem de emergência por questões de segurança).

O planeamento de cobertura GSM-R é feito, muitas vezes, com recurso a modelos empíricos como é o caso do modelo de Okumura-Hata, um dos mais utilizados, no entanto, a implementação do FRMCS levará à necessidade de utilização de novos modelos ou modificação dos já existentes acrescentando alguns fatores corretivos pois o novo sistema está previsto operar em frequências superiores ao GSM-R.

Em [6] encontram-se descritas as principais características a garantir para as comunicações móveis ferroviárias. Um sistema de comunicações ferroviárias terá de estar preparado para comboios de alta velocidade que podem atingir velocidades na ordem dos 500 km/h. Ao ter em conta a velocidade do comboio é possível prever problemas de efeito de Doppler, atraso (*delay spread*) e tempo de coerência.

## 2.3 A tecnologia FRMCS

Ainda que, como foi descrito nas secções anteriores, o GSM-R seja a tecnologia rádio mais utilizada, esteja mundialmente desenvolvido e faça face a todas as necessidades de sinalização e operação dos comboios, este aproxima-se da obsolescência e, por isso, a partir de 2010 os membros da UIC começaram a contribuir para o estudo do seu sucessor. Foi em 2014 que a UIC lançou pela primeira vez um projeto sobre o FRMCS, a futura geração de comunicações móveis ferroviárias. Esse projeto teve como objetivo responder aos requisitos inerentes à ferrovia e às novas exigências aplicacionais/operacionais, como as que se descrevem na Figura 2.3 [8].



Figura 2.3 – Requisitos e objetivos do FRMCS (baseado em [8]).

O FRMCS pretende ser a solução futura das ferrovias, isto porque estas têm uma esperança média de vida superior às das gerações de redes móveis, a duração da rede é em média 15 anos, como é referido em [8]. Por outro lado, como se pode observar na Figura 2.3, uma das peças chave do FRMCS será a capacidade de resposta aos novos desafios ao nível de cibersegurança, este deverá ter a acesso a aplicações de automatização de operações ferroviárias como: as ATO (Automatic Train Operations) e o C-DAS (Connected Driver Advisory System). Estas aplicações possibilitarão a supervisão total de todos os objetos em circulação, a monitorização da performance do novo sistema e a facilidade de resposta em caso de falha [8].

O FRMCS terá de ser interoperável e deverá suprir todas as necessidades intrínsecas à ferrovia, nomeadamente, todas as diretivas de sinalização do ETCS referidas para o GSM-R (secção 2.2.1). Uma falha na sinalização, gera falhas na qualidade de serviço (QoS – Quality of Service) e, poderá levar à paragem dos comboios ou provocar falhas na resposta a chamadas de emergência.

A gestão do espectro é outro dos aspetos referidos na Figura 2.3 onde, numa fase inicial, se prevê que o FRMCS terá que operar em paralelo com o GSM-R e, posteriormente, deverá ser dado o suporte necessário a todos os serviços do FRMCS de forma que o GSM-R possa ser desligado.

Outro aspeto indicado na Figura 2.3 é a flexibilização/independência dos requisitos de sinalização da ETCS de forma que, quando se esteja a operar em modo de comutação de pacotes, possam alterar-se as condições rádio ou a gama de frequências utilizadas, sem que se esteja a prejudicar as condições normais dos requisitos do ETCS.

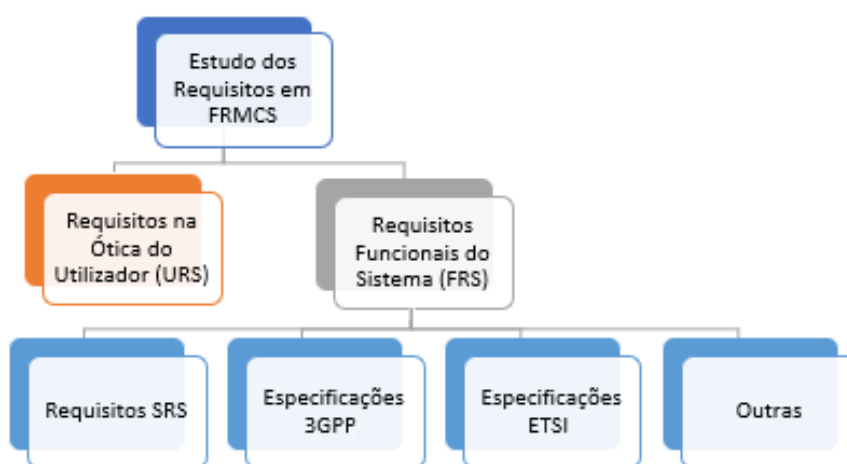


Figura 2.4 – Organização dos requisitos técnicos do FRMCS.

O estudo dos requisitos do FRMCS traz duas vertentes distintas: os requisitos na ótica do utilizador (URS) e os requisitos funcionais do sistema (FRS). Dentro destes últimos há vários órgãos que contribuem para a sua definição nomeadamente, o 3GPP, o ETSI, entre outras como se ilustra na Figura 2.4.

A missão da UIC é definir os requisitos técnicos e as normas de operação do novo sistema de comunicações móveis ferroviárias. Para tal, em dezembro de 2014, criaram o FWG (Functional Working Group) para definir requisitos suficientemente genéricos focados no domínio operacional, independentes da tecnologia e que sejam essenciais às comunicações rádio. Este grupo começou por lançar os seguintes temas:

- Requisitos ao nível do utilizador (URS);
- Requisitos funcionais/Arquitetura do sistema (FRS);
- Requisitos /necessidades a nível espectral (SRS).

O objetivo dos URS é definir um leque de requisitos tecnológicos a utilizar exclusivamente por parte do utilizador. Com isto pretendem cobrir-se as necessidades de comunicações globais no setor dos caminhos de ferro, isto é, todos os troços (urbano,

suburbano, regional e de longa distância) que, apesar de terem necessidades distintas, devem ter a mesma capacidade de resposta.

Com um grupo de representantes no domínio da ferrovia ambos da IM (Infrastructure Manager) e RU (Railway Undertaking) e com supervisão da ERA definiram-se 8 princípios fundamentais que serão utilizados para definir o esboço da rede e caracterizar o novo sistema. As aplicações de comunicação e de suporte ao novo sistema foram divididas em categorias classificando-se quanto à criticidade, performance e área de negócio. Em [9] estão descritas 72 aplicações ferroviárias cada aplicação tem uma descrição, os possíveis utilizadores, atributos funcionais e os critérios de utilidade. Foram descritas as necessidades da ferrovia, tal é relevante para a criação de standards (3GPP) mas também para a futura aceitação e testes visto que, estes são revistos pelo ETSI TC RT antes de serem enviados para o 3GPP.

A ferrovia tem ainda a considerar o facto de ser operada por diferentes recursos humanos com diferentes exigências técnicas, nomeadamente, condutores, controladores e diversos outros funcionários:

- **Do comboio** – Maquinista, equipas de catering e equipas de segurança;
- **Da Manutenção (*trackside*)** – Equipas de manutenção da ferrovia e equipas de auxílio às manobras;
- **Da Ferrovia** – Equipas de Engenheiros, operadores RU e IM, chefes de estação, etc.

Os FRS do novo sistema de comunicações ferroviárias permitem o estabelecimento de objetivos/regras para o funcionamento da nova tecnologia. Os objetivos gerais do FRMCS são a resiliência e a modularidade ao nível do software, a criação de especificações diretas que assegurem a interoperabilidade sem provocar impacto na flexibilidade do sistema, a capacidade de correr as aplicações prontas a utilizar (COTS - Commercial off The Shelf), a capacidade de um equipamento do utilizador correr as diferentes aplicações requeridas e, finalmente, o FRMCS deverá ser capaz de perdurar, ou seja, ser independente de cada tecnologia que possa aparecer no futuro.

Nos FRS são especificados promotores (atributos input e output), aplicações (que utilizam os atributos e preenchem as necessidades dos utilizadores) e requisitos terminais (aspetos HMI).

### 2.3.1 Requisitos ao nível do utilizador (URS)

Os requisitos do utilizador (URS) para comunicações de voz, no novo sistema de comunicações ferroviárias (FRMCS) foram pensados pelo FWG e deverão garantir os 8 princípios genéricos seguintes [9]:

1. **Satisfação das necessidades de comunicação das operações ferroviárias**  
– As condições de operação de uma linha variam de acordo com as condições do caminho de ferro, a velocidade máxima permitida no troço, o avanço entre os comboios, complexidade do troço ferroviário, condições atmosféricas, frequência, tendência para acidentes e/ou incidentes operacionais. O FRMCS deverá proporcionar comunicação mesmo em caso de falha na infraestrutura e deverá garantir conectividade a operadores públicos;
2. **A transição de utilizadores de uma rede FRMCS para outra (ou vice-versa) deverá ser automática** – o FRMCS garantirá o suporte às aplicações independentemente da tecnologia de acesso rádio de quem acede;
3. **O FRMCS deverá centrar-se no utilizador** – As HMI devem seguir regras, ser consistentes em todo o tipo de dispositivos e ser intuitivas para facilitar a interação;
4. **Suportar regras e princípios operacionais definidos para os países da União Europeia** – esses princípios estão definidos em [10];
5. **Suportar partilha de informação e ações sem que seja necessária intervenção humana** – deve suportar comunicações entre máquinas (M2M – Machine to Machine), ambas para suporte operacional e manutenção (atualizações de software, alterações na configuração, monitorização e diagnóstico de falhas);
6. **Atenuar o risco de falha na comunicação** – os comboios devem ter um identificador que permita saber informações de localização, um mecanismo que possa prever ruído de fundo e corrigir automaticamente problemas de comunicação em chamadas de voz em grupo;
7. **O FRMCS deverá ser rentável** – No FRMCS pretende fazer-se uso de interfaces que sejam livres (*open source*) e devidamente regulamentados. Aquando da instalação da nova tecnologia devem aproveitar-se as instalações base e equipamentos que não tenham atingido o fim de vida nas instalações GSM-R.
8. **O FRMCS deverá contemplar cibersegurança** – para prevenir possíveis ataques maliciosos que possam comprometer o sistema de comunicações ou os dados envolvidos.

Os 8 princípios enumerados anteriormente, terão diferentes tipos e utilidades no domínio aplicacional, das quais se distinguem dois grandes grupos: as aplicações para comunicação e as aplicações de suporte (darão suporte às aplicações de comunicação). Dentro das aplicações anteriormente referidas estas foram divididas em três domínios de aplicações [11]:

- **Críticas:** Estas são as aplicações essenciais à deslocação/movimentação do comboio e à sua segurança. Contempla obrigações legais, tais como comunicações de emergência, manobras, sinalização de presença, manutenção da ferrovia, ATC (Automatic Train Control), entre outros;
- **De Desempenho:** Estas aplicações ajudam a melhorar a performance das operações ferroviárias, tais como, partida dos comboios, telemetria (medição e comunicação de informações de interesse do operador ou da pessoa que desenvolveu o sistema);
- **De Negócios:** Dão suporte ao negócio ferroviário, tais como internet wireless, etc.

O FRMCS deverá dar continuidade às aplicações existentes e responder às necessidades da ferrovia de forma rápida, eficaz e pouco dispendiosa. Na Figura 2.5 estão algumas aplicações do FRMCS para os vários processos.



*Figura 2.5 – Benefícios da aplicação do 5G aos processos ferroviários.*

Os processos de automação, operações e manutenção ferroviária vão ter diversos benefícios dos quais, como se pode observar na Figura 2.5, a automatização das

operações, por exemplo, nas manobras de encravamento ou nas paragens. Os sistemas de informação serão atualizados de forma quase automática caso seja preciso informar os passageiros de eventos extraordinários. As estações e a manutenção passam a ser inteligentes pois o FRMCS, ao basear-se em 5G, trará uma comunicação massiva entre as máquinas fazendo com que, quando haja uma necessidade de manutenção esta seja solucionada de forma quase imediata. O suporte às comunicações ferroviárias permitirá a introdução de uma arquitetura flexível que permitirá diferentes concentrações de dispositivos (concentrada ou distribuída) na infraestrutura e possibilitará a gestão dos recursos ferroviários à distância. Isto só é possível porque o FRMCS trará uma nova faixa de frequências e reduzida latência.

### 2.3.2 Requisitos Funcionais (FRS)/Arquitetura do sistema FRMCS

Para trabalhar sobre os requisitos funcionais e arquitetura do FRMCS foi criado um grupo funcional ATWG (Architecture & Technology WorkGroup) que colaborou com o ETSI TC RT para refletir sobre as expectativas ao nível da arquitetura do novo sistema e, também, sobre as especificações para averiguar o que já existe no GSM-R e quais as possíveis dificuldades esperadas.

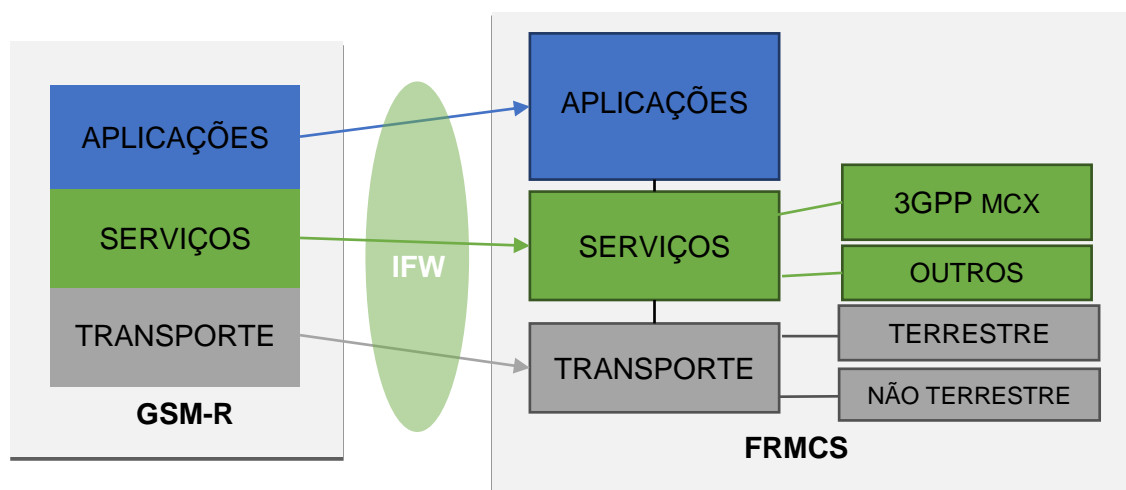


Figura 2.6 – Arquitetura do sistema FRMCS (baseado em [11]).

Como se pode observar na Figura 2.6 a arquitetura GSM-R divide-se em três grandes blocos: aplicações, serviços e transporte. No FRMCS os três blocos anteriores aparecem desacoplados pois um dos objetivos da nova arquitetura é remover as dependências entre os mesmos, sendo que cada tecnologia de acesso rádio deve operar de forma independente. As tecnologias de acesso rádio em causa são por exemplo, o LTE, 5G ou o NR no caso se serem normas 3GPP, caso contrário podem ser o Wi-Fi, comunicações via satélite, entre outras [11].

O FRMCS irá suportar serviços baseados em 3GPP MCX (Mission Critical Services), estes serviços permitem comunicações de voz, dados e vídeo ponto a ponto [11].

As aplicações FRMCS estão relacionadas com os utilizadores, por isso, tanto podem residir nos equipamentos a bordo do comboio, como nos equipamentos dispostos ao longo da ferrovia, quer nos equipamentos centralizados. Estas podem solicitar o início de uma sessão de comunicação ou simplesmente fazer parte de um grupo de comunicações ponto a ponto com outras aplicações ferroviárias [11].

A camada de transporte FRMCS representa as interações necessárias com outros serviços para proporcionar conectividade a um equipamento do utilizador (UE), por exemplo, uma camara requer conectividade e para tal, utiliza serviços de transporte que por sua vez interagem com a camada dos serviços ao nível da comunicação [11].

A flexibilidade e transparência da camada de transporte FRMCS advêm da necessidade de gerir e combinar o transporte de diferentes serviços para uma mesma sessão de comunicação, desta forma todas as alterações na rede, os *handovers* e detalhes de transporte serão completamente transparentes.

### **2.3.3 Necessidades a nível Espetral**

Existem até ao momento duas abordagens para as necessidades espectrais da nova geração de comunicações móveis ferroviárias. As abordagens consistem num primeiro período de coexistência entre FRMCS e GSM-R, onde se começam a fazer migrações de recursos e outra fase onde se dará por terminado o funcionamento do GSM-R e se estabilizará a tecnologia 5G através do FRMCS.

Durante a fase de migração entre a tecnologia existente (GSM-R) e a tecnologia sucessora (FRMCS) preveem-se diferentes tipos de necessidades e a quantidade de espectro necessária depende:

- Das aplicações suportadas;
- Do volume de tráfego;
- Do tráfego por unidade de área;
- Das características da tecnologia de acesso rádio utilizada;
- Localização no espectro da banda de frequências utilizada.

No FRMCS os critérios de qualidade terão que ser tão exigentes quanto o tipo de aplicação a suportar, o *ritmo de transmissão* necessário para o funcionamento das aplicações é variável tendo em conta a finalidade, por exemplo, em aplicações que

envolvam vídeo o *ritmo de transmissão* será mais exigente e a necessidade espectral será maior.

O elevado nível de disponibilidade/resposta é essencial numa comunicação ferroviária porque, o impacto de uma interrupção pode ser significativo para o funcionamento e segurança de todo o sistema ferroviário, como tal na fase de migração [12]:

- As REC devem ser estabelecidas dentro de 4 segundos em 95% dos casos e dentro de 6 segundos em 99% dos casos, válido para qualquer troço das linhas;
- O envio da mensagem MA (Movement Authority) não deve exceder 12 segundos tendo como probabilidade mínima 98.1576% na maioria dos casos ou 99.9967% dependendo da categoria da linha ferroviária;

Para além das necessidades anteriores, a Tabela 2.2 contém um resumo das restantes necessidades e ofertas a nível espectral para cada tipo de linha:

*Tabela 2.2 – Sumário das necessidades a nível espectral e possíveis soluções (baseado em [12]).*

	<b>Necessidades</b>	<b>Oferta</b>
<b>Alterações durante a fase de migração do GSM-R para FRMCS</b>		
<b>Generalidade das Linhas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 a 4 portadoras GSM-R;</li> <li>• 1 a 4 portadoras FRMCS;</li> <li>• Novos requisitos ETCS 2;</li> <li>• Início do teste de serviços futuros.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2x4 MHz GSM-R (@ 900MHz);</li> <li>• 2x1.4 MHz abaixo 876/921 MHz;</li> <li>• 10 MHz (@ 1900MHz) ou 2x (2x1.4 MHz / 2x3 MHz) (@ 900MHz).</li> </ul>
<b>Linhas de Áreas Densas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 a 4 ou mais portadoras GSM-R;</li> <li>• Novos requisitos ETCS 2, já com planeamento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2x7 MHz GSM-R (@ 900MHz)</li> <li>• Mínimo 10 MHz (@ 1900MHz).</li> </ul>
<b>Alterações durante a fase de coexistência entre GSM-R e FRMCS</b>		
<b>Generalidade das Linhas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• As portadoras mantêm-se (implementar até 1900MHz);</li> <li>• Aumento do número de serviços.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• As bandas de 900MHz mantêm-se;</li> <li>• Mínimo 20 MHz (@ 1900MHz)</li> </ul>
<b>Linhas de Áreas Densas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• As portadoras mantêm-se (implementar até 1900MHz);</li> <li>• Aumento do número de serviços.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• As bandas de 900MHz mantêm-se;</li> <li>• Mínimo 20 MHz (@ 1900MHz).</li> </ul>

Ao observar a primeira linha da Tabela 2.2, para a coexistência entre GSM-R e FRMCS definiu-se que este último terá disponíveis as bandas 874.4 MHz aos 880 MHz e dos 919.4 MHz aos 925 MHz.

Para além das informações da Tabela 2.2 há que considerar uma margem de 200 kHz que se apelida de banda de guarda para que, em casos críticos onde o controlo de potência do GSM-R não seja ativado e haja uma estação base FRMCS a ser interferida por um terminal GSM-R se consiga colmatar essa interferência.

Em zonas urbanas densas, segunda linha da Tabela 2.2, durante a fase de migração (coexistência de GSM-R e FRMCS), a capacidade adicionada ao espectro não irá ser suficiente. Logo será necessário acesso a espectro complementar de 10MHz de largura de banda, entre os 1900-1920 MHz. Depois da migração, última linha da Tabela 2.2, as bandas complementares continuarão a ser necessárias para cobrir as novas necessidades inerentes à comunicação ferroviária (nomeadamente, os URS e FRS referidos na subcapítulo 2.3.1 e 2.3.2), nos limites da ferrovia e em zonas de hotspot (grande concentração de utilizadores).

A comissão europeia incumbiu o CEPT-ECC (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations – Electronic Communications Committee) de estudar a possibilidade ter uma banda de frequências dedicada em exclusivo ao FRMCS sem que fossem os 4MHz da banda dos 900 MHz atualmente utilizados para o GSM-R. Em novembro de 2020 surge a decisão do ECC para a harmonização de 5.6 MHz de espectro para frequências em torno dos 900 MHz e de 10 MHz para frequências em torno dos 1900 MHz. As frequências anteriores contemplam a coexistência das tecnologias GSM-R e FRMCS pois estas agregam proteção contra interferência e reduzem os custos de investimento numa infraestrutura 5G, trazendo assim benefícios aos operadores.

## **2.4 Conceitos Gerais do 5G NR**

A tecnologia 5G irá trazer maior capacidade do que a conseguida atualmente com o GSM-R, permitindo assim maior densidade de utilizadores, um melhor suporte às comunicações entre dispositivos, diminuindo a latência e aumentando a fiabilidade do sistema.

As tecnologias 5G baseadas em *New Radio* (NR) correspondem a uma norma que foi definida pelo 3GPP semelhante, em termos de parâmetros abordados, à norma já existente para as tecnologias 3G e 4G. Se anteriormente, o 3G e o 4G ligavam as

peças, atualmente, o 5G será desenvolvido para conectar vários dispositivos como *smartphones*, carros, metros, comboios, etc.

A crescente necessidade de alocação de frequências faz com que tenham de existir adaptações constantes no espectro. Por essa razão o 3GPP atribuiu uma porção de espectro exclusivamente à tecnologia NR que, posteriormente, foi dividida em dois grupos: Frequency Range 1 (FR1) que é o grupo de frequências inferiores aos 6GHz e Frequency Range 2 (FR2) grupo onde se encontram frequências superiores aos 6GHz (para a possibilidade de utilização de ondas milimétricas). A alocação de recursos numa banda de frequências mais alta tem associadas larguras de banda superiores a 100MHz (no caso do FR1), ao contrário do que acontecia no LTE e HSPA, o que permite gerir as exigências elevadas ao nível de ritmos de transmissão, não esgotando os recursos e aumentando a eficiência visto que há maior reutilização de frequências. No entanto, frequências elevadas implicam áreas de cobertura mais limitadas quando comparadas ao LTE [13].

Tendo em conta as larguras de banda serem superiores esta tecnologia suportará aplicações tais como [14]:

- Enhanced Mobile Broad Band (eMBB): como a reprodução de vídeo 3D, ecrãs UHD e internet gigabyte;
- Ultra-Reliable and Low Latency Communication (URLCC): indústria dos drones, robôs e carros autónomos;
- Massive Internet of Things (MloT): sensores diversos.

Em *downlink*, o 5G NR utiliza Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) tal como acontecia no LTE. Em *uplink* utiliza ambos OFDM e Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) enquanto o LTE utiliza apenas este último. O 3GPP decidiu otimizar a modulação acrescentando um prefixo cíclico à multiplexagem (CP OFDM) isto permitirá colmatar possíveis erros de codificação da informação [14].

A capacidade utilização de *beamforming* nas antenas é outra das vantagens para o 5G NR. O *beamforming* permite aumentar a diretividade do sinal proveniente de uma antena, este é muito mais flexível em 5G onde pode, por exemplo, ser utilizado para otimizar a capacidade ou para diminuir consumo de potência por parte dos UE, desta forma os utilizadores conseguem ter uma melhor experiência com *ritmo de transmissão* mais elevados.

Associado ao *beamforming*, outra das funcionalidades do 5G NR é a possibilidade de utilizar antenas com MIMO (Multiple Input Multiple Output), ao ter antenas que operem

com múltiplas saídas e com *beamforming* será possível chegar mais diretamente a cada utilizador e ao mesmo tempo chegar a utilizador que estejam espacialmente dispersos. Estes aspetos permitem aumentar a eficiência espectral e a cobertura total da rede.

O 5G NR poderá aparecer como tecnologia de acesso rádio única (*stand-alone*) mas podem também, e mais provavelmente, coexistir com a tecnologia LTE já existente (*non stand-alone*). Um dispositivo que comunique em 5G pode facilmente comunicar em LTE e isso faz com que a partilha de espetro seja factível.

#### 2.4.1 Camada Física

Em [13] (*release 15* do 3GPP) encontram-se descritas as bandas de operação do 5G NR, bem como as larguras de banda que cada banda possuirá.

Tabela 2.3 – Agrupamento de frequências em 5G NR [13].

Identificação do grupo de frequências 5G NR	Gama de operação
FR1	410 MHz – 6000 MHz
FR2	24250 MHz – 52600 MHz

Como se pode observar na Tabela 2.3, o grupo de frequências FR1 contém uma gama de frequências que cobre desde os 450 MHz aos 6 GHz, enquanto a banda das ondas milimétricas (para frequências superiores a 10 GHz) denominada FR2 contém as frequências desde os 24.25 GHz aos 52.6 GHz.

Cada canal de comunicação alocado a FR1 ou FR2 terá os componentes indicados na Figura 2.7:

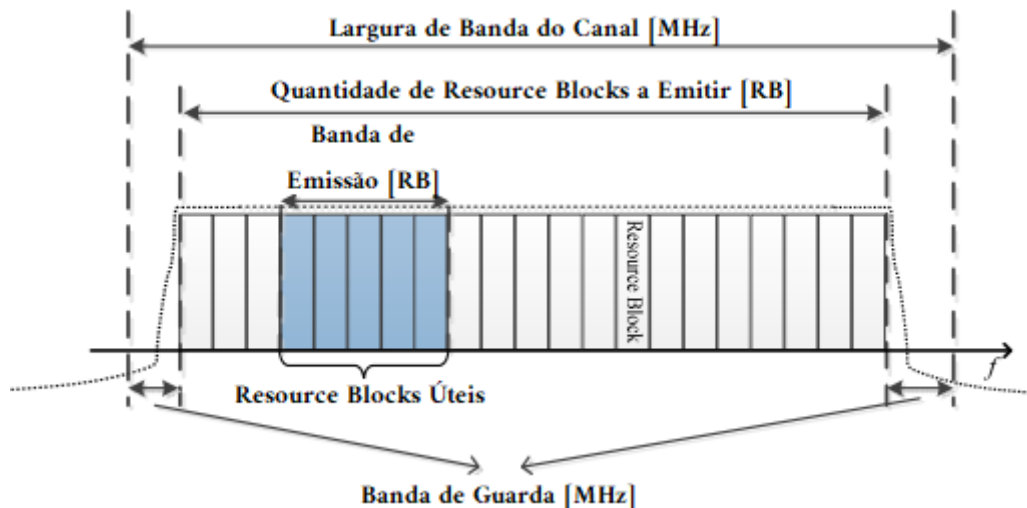


Figura 2.7 – Componentes de um canal de comunicação rádio em 5G NR.

No FRMCS baseado em 5G NR um canal rádio terá uma banda de emissão acompanhada de uma banda de guarda representada nos extremos do canal de comunicação, como se ilustra na Figura 2.7. Cada banda de emissão terá vários RB úteis (os que transportam informação útil) e onde serão atribuídos os recursos necessários a cada utilizador. Nas BTS cada canal de comunicação suporta uma portadora rádio de 5G NR quer em UL como em DL. No mesmo canal de comunicação, pertencente a uma BTS, podem ser alocados vários equipamentos (UE) e a alocação é flexível dentro do mesmo.

Em [13] estão descritos todos os intervalos de FR1 e FR2 para operação em diferentes modos de multiplexagem (FDD ou TDD), no entanto e tendo em conta o intervalo de frequências destinado ao FRMCS no contexto deste trabalho considerar-se-ão apenas os intervalos de FR1.

Tabela 2.4 – Bandas de operação 5G NR [13].

<b>Bandas de Operação 5G NR</b>	<b>Banda de Operação UL (BS Recetora / UE Emissor)</b>	<b>Banda de Operação DL (BS Emissora / UE Recetor)</b>	<b>Modo de Multiplexagem</b>
<b>N1</b>	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
<b>N3</b>	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
<b>N7</b>	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD

<b>N8</b>	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
<b>N39</b>	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
<b>N40</b>	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD

Na Tabela 2.4 encontram-se resumidas algumas das bandas de operação do intervalo FR1, como se pode ver existem bandas que serão destinadas a multiplexagem na frequência (FDD) e outras que serão utilizadas para multiplexagem no tempo (TDD). A multiplexagem na frequência (FDD) permite que os canais de comunicação UL e DL atuem em simultâneo utilizando bandas de operação distintas. No entanto, tem exigências maiores ao nível da banda de guarda para prevenir possíveis bloqueios na receção. Ao utilizar bandas de guarda significativamente grandes haverá uma porção do espectro que fica inutilizada e, desta forma, este método de multiplexagem não é o mais eficiente para obter a melhor eficiência espectral [13].

A multiplexagem no tempo (TDD) permite que a emissão em UL e DL ocupe a mesma porção de espectro, no entanto os acessos são feitos em momentos temporalmente distintos. Este fator, ao contrário do que se verifica em FDD, permite um melhor aproveitamento do espectro visto que a separação é feita no tempo e não através da uma banda de guarda. No entanto, o intervalo temporal entre UL e DL deve ter em conta o momento de saída útil informação no emissor e não deve terminar até que a emissão pare [13].

Normalmente, a maior quantidade de informação é transmitida na ligação descendente (DL), por isso, é normal que a capacidade desta ligação seja maior. Das duas multiplexagens abordadas, a temporal (TDD) é a que permite uma alocação dinâmica e flexível dos recursos rádio, no entanto, pode ter impacto na latência do sistema uma vez que, por vezes, ocorrem atrasos entre a emissão e a receção.

Para que as redes 5G NR possam suportar as aplicações eMBB, URLLC e MIIoT é necessário que a camada física seja flexível e escalável. Desta forma, foram definidas famílias OFDM com diferentes numerologias ( $\mu$ ), ou seja, uma configuração fixa para um determinado número de parâmetros, neste caso o espaçamento entre símbolos, o prefixo cíclico e o intervalo de transmissão dos símbolos. Em 5G NR os sinais de sincronismo: Primary Synchronization Signal (PSS), Secondary Synchronization Signals (SSS) e Physical Broadcast Channel (PBCH) utilizam: 15 kHz, 30 kHz ou 60 kHz de Subcarrier Spacing (SCS) para frequências do intervalo FR1. Assim sendo o

espaçamento entre portadoras é calculado como uma potência de 2, como se indica na equação (2.1) [13]:

$$\Delta f = 2^{\mu} \times 15 \text{ [kHz]} \quad (2.1)$$

Na equação (2.1),  $\Delta f$  é o espaçamento entre subportadoras (SCS) e  $\mu$  indica a numerologia configurada.

Tabela 2.5 – Parâmetros de simulação [13].

$\mu$	SCS	Prefixo Cíclico
0	15	Normal
1	30	Normal
2	60	Normal e Estendido

A Tabela 2.5 contém as numerologias e as respectivas correspondências com o espaçamento entre subportadoras aplicando a equação (2.1). A tabela continha maior espaçamento entre portadoras, no entanto e tendo em conta que no contexto deste trabalho, só se consideram as frequências da gama FR1, esses não serão apresentados.

Cada símbolo OFDM terá um prefixo cíclico em DL, no entanto, em UL cada subportadora poderá sofrer uma pré-codificação, antes da colocação do prefixo cíclico, através da transformada DFT-spread (Discrete Fourier Transform-spread) este pode ser ativado ou desativado. O prefixo cíclico é utilizado para contornar a interferência intersimbólica (ISI) derivada do fenómeno de multipercurso. O 5G NR suporta prefixo cíclico normal ou estendido tal como acontecia no LTE sendo que, a determinação do tamanho do prefixo cíclico a utilizar deve ter em conta o tipo de ambiente de propagação (Outdoor/Indoor), a frequência e o tipo de serviço [13] [15].

Através do prefixo cíclico no símbolo OFDM é possível medir possíveis tempos de atraso na entrega de uma *trama*. Os mecanismos de TA (Timing Advance) é uma das técnicas utilizadas para ajustar os tempos de receção entre UL e DL [14].

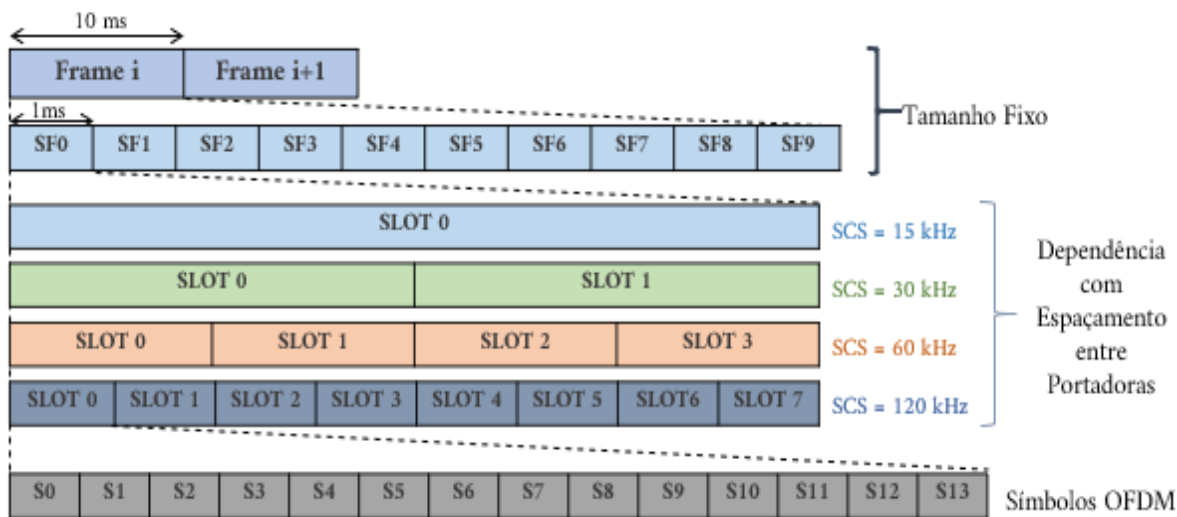


Figura 2.8 – Estrutura de uma Trama e Subtrama 5G NR em 3GPP.

Como se observa na Figura 2.8, para 14 símbolos OFDM a duração da trama é 140 ms, 10ms por trama e 1 ms por *subtrama*. As diferentes numerologias traduzem-se em diferentes *time-slots* por *subtrama* e quanto maior for o espaçamento entre canais maior a quantidade de *time-slots* por símbolo OFDM.

Numa rede 5G NR cada RB contém 14 símbolos no domínio do tempo e 12 subportadoras na frequência sendo que, a largura de banda de cada RB não é fixa ao contrário do LTE onde cada RB tem uma largura de banda fixa de 180 kHz. No 5G NR prevê-se uma eficiência de 99% e, por isso, é expectável atingir larguras de banda até 100MHz para frequências a baixo dos 6GHz (FR1), mas este valor depende da numerologia escolhida anteriormente.

Tabela 2.6 – Número de RBs por largura de banda do canal de transmissão.

SCS [kHz]	5 [MHz]	10 [MHz]	15 [MHz]	20 [MHz]	25 [MHz]	30 [MHz]	40 [MHz]	50 [MHz]	100 [MHz]
	N <sub>RB</sub>								
15	25	52	79	106	133	160	216	270	-
30	11	24	38	51	65	106	133	162	273
60	-	11	18	24	31	38	51	65	135

Como se encontra resumido na Tabela 2.6, o número de RB varia de acordo com a largura de banda do canal e com a numerologia, sendo que este número cresce com o aumento da largura de banda do canal.

A largura de banda de guarda mínima é calculada de acordo com a equação (2.2):

$$MinGBW = \frac{CHBW_{[kHz]} - (RB_{Max}^{\mu} \times \Delta f^{\mu} \times 12)}{2} - \frac{\Delta f^{\mu}}{2} \quad (2.2)$$

Na equação (2.2),  $CHBW_{[kHz]}$  é a largura de banda do canal máxima em kHz,  $RB_{Max}^{\mu}$  é o número máximo de RB e  $\Delta f^{\mu}$  é o espaçamento entre subportadoras (SCS) cada um calculado em função de  $\mu$  que indica a numerologia configurada.

Tendo em conta as diferentes numerologias, os valores máximos de largura de banda do canal ( $CHBW_{[kHz]}$ ) e de RB indicados em [13] registaram-se os resultados obtidos para as larguras de banda de guarda na Tabela 2.7

Tabela 2.7 – Número máximo de NR RB para cada numerologia.

$\mu$	SCS [kHz]	Banda de Guarda Mínima [kHz]	Largura de Banda Mínima [MHz]	CHBW [MHz] (Largura de Banda Máx.)	Número Mínimo de RBs	Número Máximo de RBs
0	15	692.5	5	50	25	270
1	30	845	5	100	11	273
2	60	1370	10	100	11	235

A performance do sistema está dependente do tipo de aplicação que este suportar, quanto mais baixo for o espaçamento entre subportadoras (SCS), maior é a área da célula. No entanto como cada *time-slot* tem um número fixo de símbolos OFDM um espaçamento entre portadoras pequeno poderá reduzir a duração do *time-slot* e tal só poderá ser utilizado se as aplicações em causa forem de baixa latência.

O 5G NR suporta modulação QPSK, 16-QAM, 64-QAM, e 256-QAM, sendo que para cada uma delas o número de bits por símbolo será diferente: 2, 4, 6, 8 bits por símbolo, respetivamente. Ambas as modulações podem ser utilizadas com diferentes tipos de codificação (*coding rates*) que variam deste 1/3 até 1.

#### 2.4.2 Arquitetura FRMCS: LTE e 5G NR

Como já havia sido descrito em [13] o 5G NR poderá considerar duas vertentes de operação dentro de uma célula: *standalone* e *non-standalone*. No caso do *non-standalone* a informação de sinalização/controlo da célula é feita em LTE, enquanto na vertente *standalone* o controlo/sinalização é todo feito em 5G.

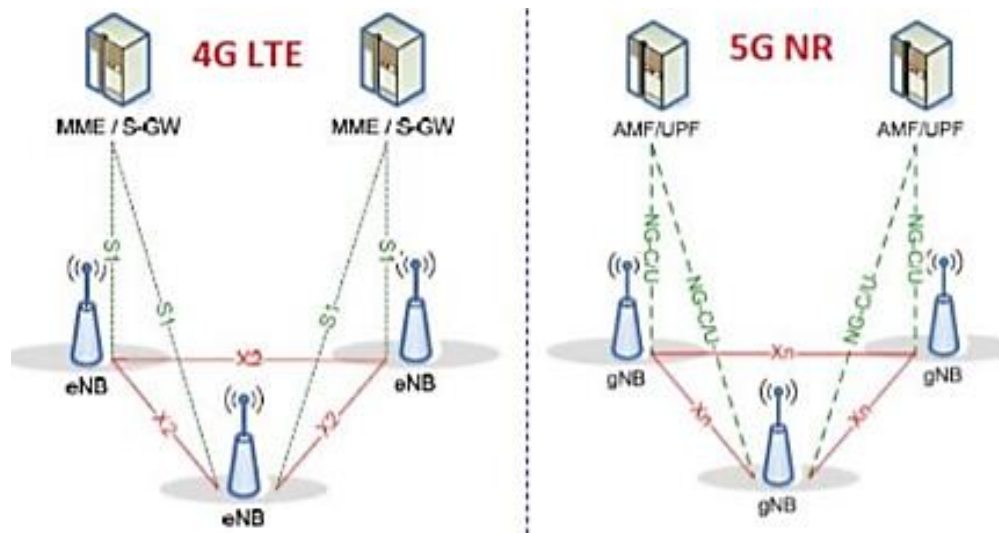


Figura 2.9 – Arquitetura das redes 5G NR face ao LTE (retirado de [16]).

Como se pode observar na Figura 2.9, a nova interface rádio dos sistemas 5G pode suportar NR e/ou *Evolved - Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN), esta última é uma evolução do UTRAN que é a interface rádio do UMTS. As redes 5G NR têm capacidade para interagir com *Next Generation Core Network* (NG-CN). Na Figura 2.9 a interface NG-C/U é a interface de controlo do utilizador por parte da NG-CN [16].

As estações base (gNB) comunicam quer com o core 5G, quer com o core 4G, mais comumente denominado por *Evolved Packet Core* (EPC) pois o LTE funciona por comutação de pacotes e proporciona uma ligação IP entre o UE e uma rede do tipo Packet Data Network (PDN) como é o caso da Internet. As estações base utilizam ligações NG-CN ou NG-C/U tal como acontecia no LTE com os S1 para comunicar com o core da rede 5G através das *Mobility Management Entity* (MME). No entanto, nas redes *non-standalone* cada estação base 5G NR (gNB) precisa de uma estação base LTE (eNodeB) para se ancorar e para a controlar, pelo contrário nas redes *standalone* a estação base (gNB) não precisa de se ancorar a uma célula que opere em LTE para se ligar ao core da rede, apenas necessita de uma ligação NG-CN [16].

O desafio maior nesta nova arquitetura continua a ser a criação de um standard para as frequências uma vez que na fase de migração GSM-R e FRMCS estas vão ter de coexistir. No entanto numa fase inicial e do ponto de vista mais macro da arquitetura podemos visualizar o exemplo seguinte:

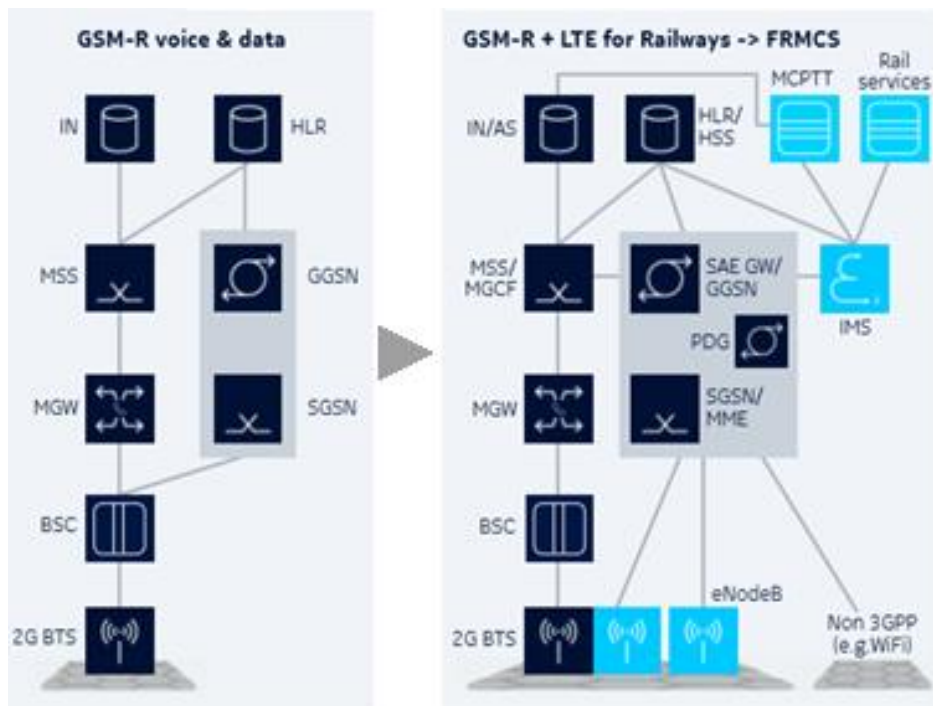


Figura 2.10 – Arquitetura do FRMCS fase de migração [17].

Como se pode observar na Figura 2.10, a arquitetura à esquerda é a arquitetura do sistema GSM-R que já havia sido resumida no subcapítulo 2.2.2, por sua vez à direita tem-se a junção da arquitetura GSM-R com a arquitetura LTE. É possível visualizar que os blocos GSM-R se mantêm, no entanto vão ter de se especializar para suportar novas aplicações ferroviárias.

O HLR evolui para HSS (Home Subscriber Server) onde é feita a gestão e são guardados os dados dos UE que se registem nas gNB. Nesta arquitetura já é possível suportar qualquer tecnologia de acesso rádio recorrendo apenas a atualizações de software para o HSS como o MSS (Mobile Switching Center Serve). No geral esta migração permitirá tirar partido da infraestrutura existente, dando-lhe suporte até que se possa desligar, daí numa fase inicial as gNB aparecerem co-localizadas com as BTS GSM-R [17].

Até 2025 é esperado que todos os operadores ferroviários tenham o GSM-R implementado e possam fazer atualizações principalmente introduzindo o GPRS para dar suporte ao IP (Internet Protocol), esta preparação permitirá fazer a evolução para as futuras gNB FRMCS em 2030 [17].



## 3 Planeamento em FRMCS

### 3.1 Introdução

A alocação de novas bandas de frequência, segundo [18] tem como principal meta a coexistência entre GSM-R e FRMCS. Como foi visto anteriormente, o FRMCS contemplará aplicações mais exigentes e, por outro lado, será menos tolerante a atrasos, assim sendo é necessário fazer um estudo de todos os requisitos ao nível da cobertura e da capacidade necessária.

A abordagem a utilizar será dividida em dois momentos distintos, um momento onde se considera a coexistência dos sistemas, ou seja, aproveitam-se todos os recursos físicos do GSM-R incluindo a gama de frequências: 874.4-880.0 MHz (UL) e 919.4-925 MHz (DL). Por fim, a fase após a migração é a fase onde o sucessor do GSM-R operará segundo LTE ou 5G NR para frequências no intervalo dos 1900-1910 MHz.

### 3.2 Interface Rádio FRMCS

Tal como referido anteriormente, o sistema FRMCS basear-se-á na tecnologia 5G. Assim, é fundamental identificar os principais parâmetros que influenciarão o planeamento rádio.

#### 3.2.1 Parâmetros do sistema

A transmissão FRMCS será feita em TDD. A banda de frequências a considerar para a tecnologia contempla uma fase de coexistência com GSM-R e como tal considerar-se-á a banda do GSM 900 MHz (FDD). Posteriormente à fase de migração utilizar-se-ão as bandas: dos 1900 MHz aos 1920MHz e dos 2290 MHz aos 2400 MHz, a frequência central da primeira banda TDD estará nos 1905 MHz. Em [19] estão apresentados os parâmetros do sistema FRMCS tendo em conta a seguinte configuração de estação base e equipamento móvel:

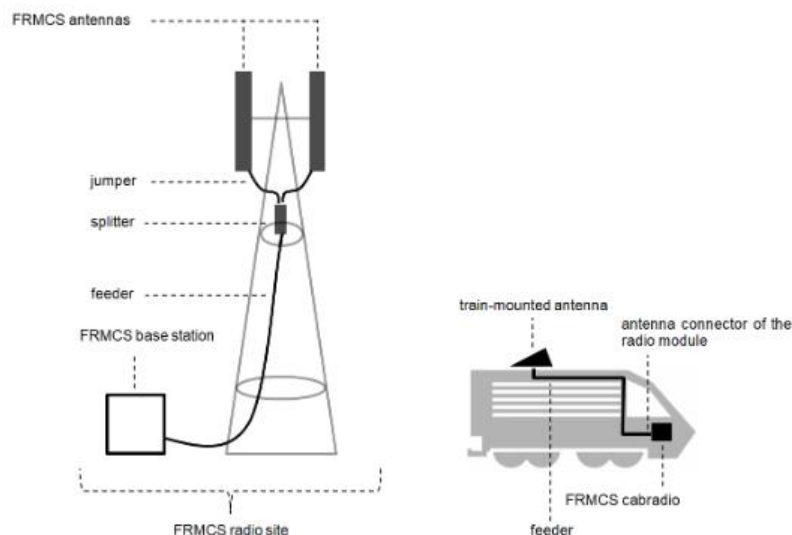


Figura 3.1 – Equipamento na Estação Base e no UE (retirado de [19]).

Como ilustra a Figura 3.1, a antena da estação base é constituída por conectores (jumper), um splitter, um feeder entre as antenas e o armário onde ficam as unidades remotas (URR) e os módulos de switching/routing. No caso do UE é esperada uma antena no topo do comboio, com um feeder que interligará ao módulo rádio na cabine do condutor.

O transporte da informação é todo feito por *tramas* e a configuração da trama FRMCS será a configuração zero, ou seja, escolha recai sobre a configuração que permitir um melhor equilíbrio de carga (*load*) entre a informação que chega ao comboio (DL) e a que este envia (UL). No capítulo 2.3 a informação mostra que com a inclusão das novas aplicações críticas, como por exemplo o vídeo crítico, faz com que tráfego UL (do comboio para a infraestrutura) seja privilegiado. Assim sendo a configuração da trama escolhida terá um rácio de 3, ou seja, das 8 *subtramas*, 6 serão para tráfego UL e 2 para tráfego DL.

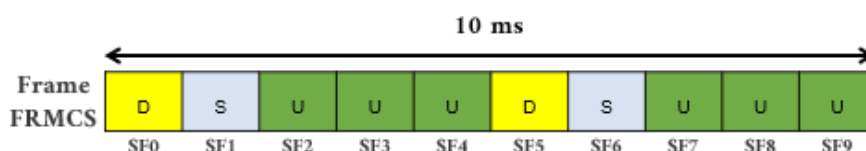


Figura 3.2 – Estrutura da Trama FRMCS.

Como se pode observar na Figura 3.2, a trama FRMCS tem duração de 10ms onde transporta 10 *subtramas* de 1 ms, onde duas delas são para tráfego DL (D), seis são para tráfego UL (U) e ainda existem duas *subtramas* especiais (S). Estas últimas são utilizadas para fazer a transição entre as *subtramas* de DL e UL, funcionando como o equivalente a um tempo de guarda [19].

Quando maior o espaçamento entre as suportadoras (SCS) menor o prefixo cíclico, em FRMCS será necessário considerar maiores prefixos cíclicos para reduzir a questão da interferência inter-simbólica, tal implica a utilização de SCS igual a 15kHz, mas pode dar-se o caso de utilizar outros valores de espaçamento maiores em cenários de menor latência. Nos casos em que é utilizado o prefixo cíclico normal as *subtramas* especiais transportam 14 símbolos OFDM onde 9 símbolos são utilizados para transporte em DL, seguem-se 3 símbolos de guarda e por fim 2 símbolos utilizados para transporte de informação em UL. No caso do prefixo cíclico estendido, considerado neste trabalho, o número de símbolos OFDM é igual a 12.

O esboço das interações celulares da rede de acesso rádio Figura 3.3:

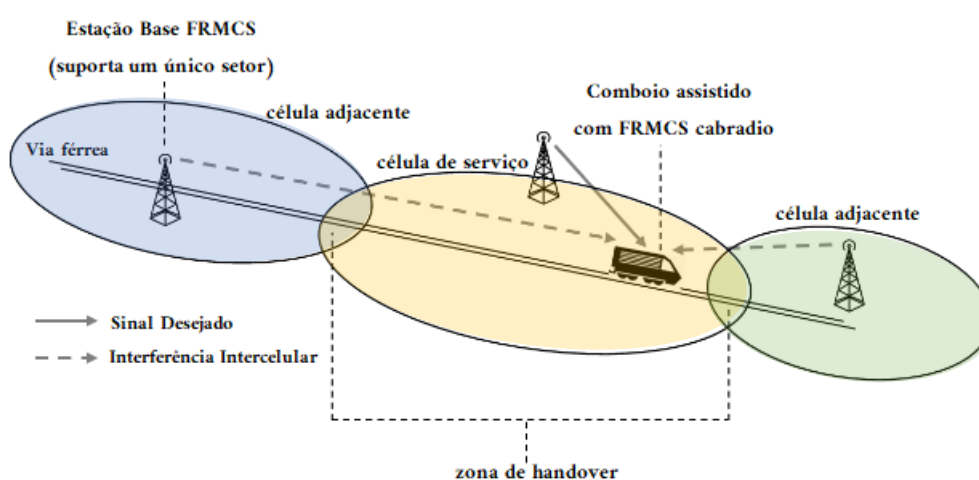


Figura 3.3 – Arquitetura celular em FRMCS.

Como se pode observar na Figura 3.3, quando o comboio está em circulação na via-férrea ele faz a deslocação entre células que por sua vez são garantidas por estações base pertencentes a diferentes controladores. Há também zonas onde ocorrerá *handover* e o comboio passará a estar na área de localização de uma célula diferente, sendo necessário fazer a deteção de qual a célula que melhor o serve (*Best Server*).

A velocidade a que o comboio se desloca, depende do tipo de ambiente característico da linha e por sua vez, influenciará o ritmo de transmissão de cada célula. Neste estudo assume-se que a altura, o azimute e o ângulo de elevação (*tilt*) das antenas será o mesmo das antenas GSM-R devido ao aproveitamento da infraestrutura existente.

Em contraste com os UE tradicionais, os UE em FRMCS têm uma arquitetura distribuída, ou seja, a antena está colocada no topo do comboio e existe um troço de cabos e conectores que faz a ligação ao módulo rádio presente na cabine do condutor. Isto faz com que haja perdas adicionais.

### 3.2.2 Reutilização de frequências

A questão da reutilização de frequências é importante não só pela diminuição da interferência Intercelular, mas como pela questão da gestão dos recursos rádio nomeadamente os RB.

Em [19] é apresentado um estudo sobre três cenários: alta velocidade, baixa densidade e elevada densidade. A baixa e elevada densidade estão relacionadas com os tipos de ambientes onde está inserida a ferrovia: rural, urbano e suburbano, ambos ambientes contabilizam diferentes densidades de utilizadores e de mobilidade.

Para cada cenário anteriormente descrito foram consideradas diferentes velocidades médias e diferentes números de comboios por célula, como se pode ver na Tabela 3.1.

*Tabela 3.1 – Características dos três cenários considerados [19].*

Cenário	Ambiente MFCN equivalente	Velocidade Média [km/h]	Número de comboios por célula
Alta Velocidade	Macro Rural	300	4
Baixa Densidade		100	3
Elevada Densidade	Macro Urbano	50	5

Considerando as características presentes na Tabela 3.1, o planeamento de frequências tem de contabilizar a ocupação da célula por diferentes quantidades de comboios.

O passo seguinte é verificar qual a interferência intercelular provocada pelas células adjacentes à célula onde se encontra o comboio e, para tal, divide-se o número de RB pelos dois setores da célula, deste modo existem duas interferentes uma à esquerda e outra à direita da célula que está a servir o comboio.

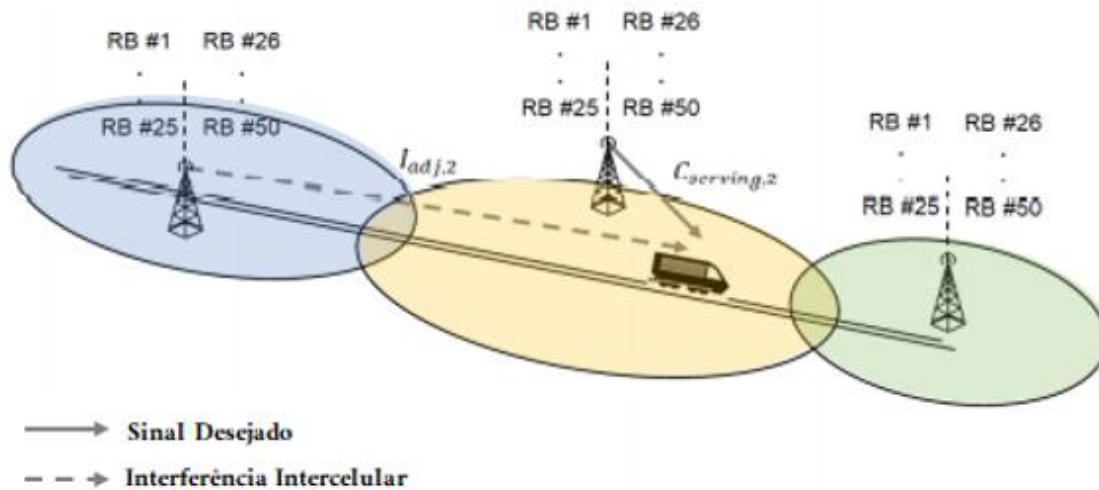


Figura 3.4 – Distribuição do sinal e das células interferentes em FRMCS.

Como se pode observar na Figura 3.4, a célula que está a servir o comboio é denominada “ $C_{serving,1}$ ” e as adjacentes, à direita e à esquerda, respetivamente, são as denominadas “ $I_{adj,1}$ ” e “ $I_{adj,2}$ ”.

Tendo em conta que cada setor da célula utiliza diferentes recursos é desejável que as células adjacentes tenham uma utilização de recursos escalonada, ou seja, a primeira metade da célula utilizaria do RB1 ao RB25 e a segunda metade os restantes 25 RB.

### 3.2.3 Ritmos de Transmissão durante e após migração GSM-R para FRMCS

Uma parte do espectro será utilizada para dar suporte às aplicações críticas, estas têm volumes de tráfego mínimos que precisam de ser garantidos, para além disso numa determinada área existe uma quantidade de tráfego que tem que ser agregada, existem influências vindas da tecnologia de acesso rádio e da localização da banda de frequências no espectro [12].

Nesta fase de migração do GSM-R para o FRMCS serão contempladas aplicações designadas críticas, ou seja, todas as que sejam necessárias à deslocação do comboio, à segurança e às obrigações legais anteriormente descritas no subcapítulo 2.3.1. Subdividiram-se os ambientes ferroviários em três segmentos: baixa densidade de utilizadores, elevada densidade de utilizadores (zonas urbanas) e alta velocidade, sendo que para cada um desses segmentos é calculado o ritmo de transmissão máximo com base num comboio de referência, ou seja, um comboio que inclua equipamentos e funcionários a bordo. O tráfego na estação de referência é independente do tráfego nos diferentes segmentos uma vez que, uma estação de referência tem disponíveis bandas de frequências complementares, há uma densificação da rede e suporta acessos por diferentes tecnologias.

Os resultados de ritmo de transmissão para os diferentes segmentos ferroviários em [12] foram calculados com base nos pressupostos utilizados em [20] para LTE a 900 MHz. No entanto, o 5G NR trará resultados idênticos ao LTE por se basearem nos mesmos pressupostos.

As Tabelas Tabela 3.2 e Tabela 3.3 representam uma comparação entre os objetivos de ritmo de transmissão, por comboio de referência, durante a fase de migração para aplicações críticas com e sem aplicação vídeo crítico (auxílio de vídeo para controlo remoto de agulhas/ manobras), respetivamente. Os resultados apresentados em ambas as tabelas partem do pressuposto que existe um aproveitamento dos sites GSM-R e, por isso, a dimensão das células FRMCS será idêntica às GSM-R sem que haja necessidade de densificar o número de sites existentes.

Tabela 3.2 – Tráfego durante a fase de migração por área [12].

Segmento ferroviário	Tráfego DL [Mbps]	Tráfego UL [Mbps]	Número de comboios por km	Tamanho da célula [km]	Tráfego DL por célula [Mbps]	Tráfego UL por célula [Mbps]	App Crítica Vídeo	
<b>Baixa Densidade</b>	3.5	3.49	0.33	8	9.24	9.22	✓	
					0.53	0.51		
<b>Elevada Densidade</b>			0.67			18.77	18.73	
						1.08	1.04	
<b>Alta Velocidade</b>	0.2	0.19	0.5		14.00	13.97	✗	
					0.80	0.77		

Como se pode observar na Tabela 3.2, tendo em conta a aplicação de vídeo a ligação mais limitadora terá que assegurar 3.5 Mbps por outro lado, sem esta aplicação apenas teriam que ser garantidos 0.2 Mbps para tráfego por comboio. Analisando o tráfego por célula o ritmo de transmissão mínimo seria 9.24 Mbps no caso de contemplar a aplicação vídeo e 0.53 Mbps caso contrário.

Conclui-se através dos dados da Tabela 3.2 que os segmentos que não tiverem em consideração a aplicação de vídeo têm requisitos a nível ritmo de transmissão por comboio referência cerca de 17 vezes menores. Pode verificar que o valor tráfego

esperado na ligação descendente é 200 kbps por comboio e pelo menos 530 kbps por célula excluindo a aplicação vídeo, caso contrário na ligação descendente o tráfego é 3.5 Mbps por comboio e pelo menos 9.24 Mbps por célula.

A razão principal para o estudo de tráfego focado na aplicação de vídeo é a perceção das condições de continuidade dos serviços GSM-R, as aplicações que esta tecnologia garante e também qual seria o impacto da introdução de novas funcionalidades como por exemplo, comboios autónomos. No entanto, o FRMCS prevê outras aplicações de automação e controlo (ATC), para além das existentes em GSM-R, como é o caso do acoplamento virtual que opera em ETCS nível 3 e fornece dados importantes sobre as condições de circulação [12].

A Tabela 3.3 ilustra os resultados de tráfego da ligação descendente (DL) e ascendente (UL) que se pretendem obter numa fase pós migração e que inclui as novas aplicações do FRMCS como a referida anteriormente.

*Tabela 3.3 – Tráfego pós migração por segmento [12].*

Segmento ferroviário	Tráfego DL [Mbps]	Tráfego UL [Mbps]	Número de comboios por km	Tamanho da célula [km]	Tráfego DL por célula [Mbps]	Tráfego UL por célula [Mbps]	App AV	
<b>Baixa Densidade</b>	4.38	7.42	0.33	8	11.55	19.60	✓	
					1.10	9.15		
<b>Elevada Densidade</b>			0.67			23.45	39.79	
					2.22	18.57		
<b>Alta Velocidade</b>	0.42	3.46	0.5			17.50	29.70	✗
						1.66	13.86	

Observando a Tabela 3.3, a ligação descendente (downlink) com a aplicação de acoplamento virtual terá de assegurar 4.38 Mbps, sem esta aplicação apenas teriam de ser garantidos 0.42 Mbps para tráfego por comboio. Quanto à ligação descendente para uma célula que cubra uma zona urbana (segmento de elevada densidade) o ritmo de transmissão mínimo seria 23.45 Mbps no caso de contemplar a aplicação vídeo e 2.22

Mbps caso contrário. Verifica-se que a aplicação de acoplamento virtual gera cerca de dez vezes mais tráfego downlink numa célula que as aplicações gerais.

Conclui-se através dos dados da **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** que os segmentos que não tiverem em consideração a aplicação de acoplamento virtual têm um ritmo de transmissão por comboio cerca de 4 Mbps menor. É de salientar que o tráfego da ligação ascendente (uplink) das células tem valores superiores ao downlink porque esta aplicação de acoplamento permitirá o envio de grande quantidade de informação a ser difundida para os comboios. O tráfego na ligação descendente é 0.42 Mbps por comboio e pelo menos 1.10 Mbps por célula excluindo a nova aplicação, caso contrário o tráfego é 4.38 Mbps por comboio e pelo menos 11.55 Mbps por célula.

Comparando os resultados de tráfego da Tabela 3.2 e Tabela 3.3 demonstram que o tráfego será muito maior na fase posterior à migração do sistema GSM-R para FRMCS, sendo este um dos grandes objetivos desta nova tecnologia.

### 3.3 Parâmetros Técnicos do FRMCS

Tendo em conta as características de funcionamento dos emissores e recetores em FRMCS, os novos serviços/necessidades tecnológicas e as diversas morfologias a considerar para uma linha ferroviária, é necessário efetuar uma estimativa de cobertura da rede (*Link Budget*) que, por sua vez, levará ao cálculo do raio/áreas das células 5G NR. O cálculo do *Link Budget* assume os parâmetros da Tabela 3.4 resumidos a partir de [19], quer para FDD como para TDD.

Tabela 3.4 – Parâmetros da Estação Base FRMCS [19].

Estação Base FRMCS (gNB)		
Parâmetros de planeamento FRMCS	Valor	Unidade
Potência de Emissão Máxima por Conector	46	dBm
Nº máximo de RBs úteis	50	RB
Ganho da Antena	18	dBi
Largura de Banda	10	MHz
Largura de Banda Ocupada	9	MHz
Figura de Ruído	10	dB

A utilização de LTE ou 5G NR pressupõe diferentes configurações no modo TDD, estas variam com a distribuição da carga ao longo dos canais de referência e com a repartição da sua utilização quer em UL como DL. Em [12] e tal como descrito nos subcapítulos

**Erro! A origem da referência não foi encontrada.** a introdução de aplicações de vídeo em tempo real (críticas) e, conseqüentemente, mais exigentes faz com que a estrutura da *trama* assumida seja a estrutura “0”. O número de RBs depende da numerologia escolhida e da largura de banda do canal. A banda ocupada é igual a 9 MHz pois resulta do produto entre o número de RB úteis, o número de subportadoras por símbolo OFDM (12) e o espaçamento entre elas 15 kHz.

O valor de potência máximo é medido à saída da antena e antes de qualquer repartidor pelo que será necessário associar o valor das perdas nos cabos para descobrir qual desta potência é recebida. O valor do ganho da antena da estação base tem em consideração o diagrama de radiação das mesmas. A atenuação por perdas nos cabos estará compreendida entre 1.48 dB e 2.22 dB, estes valores foram fornecidos nos ficheiros de medidas por parte da empresa Solvit.

A potência é distribuída de igual forma por todos os RBs, no entanto, em [19] prevêem que este valor possa ser menor nas zonas onde haja menor distância entre sites visto que, uma potência menor permite reduzir a interferência entre os mesmo sem prejuízo para os requisitos de cobertura.

Tabela 3.5 – Parâmetros do Móvel FRMCS [19].

<b>Equipamento Embarcado No Comboio</b>		
<b>Parâmetros de planeamento FRMCS</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Potência de Emissão Máxima por Conector</b>	31	dBm
<b>Figura de Ruído</b>	5	dB
<b>Altura da Antena</b>	4	m

Na Tabela 3.5 pode ver-se que a potência de emissão definida para o móvel FRMCS é 31 dBm referente à primeira classe potência nas especificações do 3GPP. O valor da figura de ruído é igual a 5 dB (valor típico indicado pelos fabricantes dos dispositivos) e altura da antena móvel colocada nas carruagens é igual a 4 metros. A antena a utilizar considerada para as simulações a realizar será a antena “*Sencity Rail*” da HUBER+SUHNER cujas especificações se encontram no Anexo A, esta antena é própria para aplicações ferroviárias e a gama de frequências suportada coincide com a gama de frequências a considerar em FRMCS.

O FRMCS suportar-se-á nos *sites* GSM-R onde são consideradas duas antenas por *site*, com a mesma altura, o mesmo azimute e a mesma elevação (*tilt*).

### 3.4 Dimensionamento da Ligação Ascendente (UL)

O *Link Budget* é dimensionamento da ligação, contabilizando todos os ganhos e perdas desde o emissor até ao recetor. Este é um passo fundamental no planeamento de uma rede de comunicações móveis. O *Link Budget* relativo à ligação ascendente permite calcular a sensibilidade da estação, valor de potência a partir do qual esta escutará um móvel e, por sua vez, o valor de atenuação máxima que servirá de teto para os cálculos da ligação descendente.

Os parâmetros da estação base e do equipamento móvel foram apresentados no capítulo 3.3. Resta acrescentar que o ritmo de transmissão *uplink* considerado na fronteira da célula foi 0.5 Mbps para cada canal, tendo prevista uma probabilidade de cobertura de 95%.

#### 3.4.1 Sensibilidade da Estação Base FRMCS

Tendo em conta os parâmetros do sistema referidos no subcapítulo 3.3, o primeiro passo para estimar a cobertura do sistema FRMCS é o cálculo da sensibilidade da estação base (nível de sinal requerido na estação base). Primeiramente é necessário calcular a densidade de ruído térmico por RB de acordo com a equação (3.1):

$$N_{RB_{UL}} = N_T + 10 \times \log_{10}(BW_{RB}^{\mu}) + N_F \quad (3.1)$$

$$BW_{RB}^{\mu} = SCS \times N_{RB} \times 12 \quad (3.2)$$

Como indicado na equação (3.1), a densidade de ruído por RB ( $N_{RB_{UL}}$ ) será igual à soma da densidade de ruído térmico ( $N_T$ ) igual a -174 dBm/Hz, com o logaritmo da largura de banda ocupada pelos RB em função do espaçamento entre subportadoras ( $BW_{RB}^{\mu}$ ) e a figura de ruído do recetor ( $N_F$ ). A largura de banda por RB calcula-se de acordo com (3.2) e é igual ao produto entre 12 (o número de subportadoras OFDM por símbolo), o número total de RBs úteis ( $N_{RB}$ ) e o espaçamento entre as subportadoras que depende da largura de banda do sistema.

Para determinar a sensibilidade da gNB é necessário saber a relação sinal interferência máxima e a margem de interferência da ligação.

$$S_{gNB} = N_{RB_{UL}} + SINR + I_m \quad (3.3)$$

A relação sinal-interferência ( $SINR$ ) é dependente da banda considerada, neste caso a banda de operação 39 com 50 RB foi considerado o valor tabelado em [21].

A margem de interferência ( $I_M$ ) é igual a 2 dB, a figura de ruído da estação base depende do tipo de ambiente pode variar entre 5, 10 e 13 dB conforme seja *wide area*, *medium range* e *local area*, respetivamente, neste caso o valor escolhido foi 10 dB por porque as estações base acima de 38 dBm de potência são consideradas *medium range* [22].

### 3.4.2 Atenuação segundo o modelo IEEE 802.16 SUI

Em [23] é apresentado o cálculo da atenuação de propagação segundo o modelo IEEE 802.16 SUI, este modelo é adequado para frequências de 2 a 4 GHz, no entanto a aplicação à banda dos 3.5 GHz não foi avaliada. No contexto deste trabalho o modelo apresenta-se como uma extensão do modelo de Okumura-Hata uma vez que, é também um modelo empírico e derivou de medidas feitas na cidade de Turim (Itália) para frequências superiores a 2GHz. O cálculo da atenuação de propagação é dado pelas equações (3.4) e (3.5).

$$L_p[dB] = A + 10 \times \gamma \times \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + \chi_h + \chi_f + \chi_\sigma \quad \text{onde } d > d_0 \quad (3.4)$$

$$A = 20 \times \log_{10} \left( \frac{4\pi l_0}{\lambda} \right) \quad (3.5)$$

Como se pode observar a equação (3.4) representa o cálculo da atenuação de propagação caso o móvel esteja a uma distância superior a  $d_0$  metros da estação base. Neste caso  $d_0$  é igual a 100 metros, nos casos em que a distância é inferior a este valor o cálculo da atenuação é unicamente representado pelo valor da atenuação em espaço livre (valor  $A$ ) na equação (3.5).

Na equação (3.6) o parâmetro  $\lambda$  é o comprimento de onda, e expoente de atenuação ( $\gamma$ ) é dado por:

$$\gamma = a - b \times h_b + \frac{c}{h_b} \quad (3.6)$$

Onde  $h_b$  é a altura da BTS acima do terreno e pode variar entre 10 e 80 metros. As letras a, b, c são constantes e dependem do tipo de ambiente onde estão inseridas como se pode verificar na Tabela 3.6:

Tabela 3.6 – Parâmetros de simulação retirados de [23].

Parâmetros do Modelo	Tipo de Terreno		
	A	B	C
a	4.6	4	3.6
b	0.0075	0.0065	0.005
c	12.6	17.1	20

Onde:

- A – Ambientes densos ou com vegetação moderada;
- B – Condições intermédias entre A e C;
- C – Ambientes rurais com pouca densidade de vegetação (atenuação de percurso toma o valor máximo neste tipo de ambiente).

Para além dos parâmetros anteriormente considerados são ainda adicionados alguns fatores corretivos, como se pode observar nas equações (3.7) e (3.8):

$$\chi_f = 6 \times \log_{10} \left( \frac{f}{2000} \right) \quad (3.7)$$

$$\chi_h = \begin{cases} -10.8 \times \log_{10} \left( \frac{H_m}{2} \right) & \text{Terreno do tipo A ou B} \\ -20 \times \log_{10} \left( \frac{H_m}{2} \right) & \text{Terreno do tipo C} \end{cases} \quad (3.8)$$

No fator corretivo da equação (3.8) o parâmetro  $H_m$  é a altura do recetor e pode variar entre 2 e 10 metros. O valor do desvio padrão ( $\chi_\sigma$ ) varia entre 8.2 e 10.6 dB dependendo do tipo de terreno e densidade de vegetação.

Os dados fornecidos pela Solvit no âmbito deste trabalho continuam alguns indicadores relativos à densidade urbana dos PK avaliados, assim sendo foi extrapolado o tipo de ambiente (A, B ou C) através desse valor de entrada. Dessa extrapolação resultou que a maioria dos pontos da linha ferroviária estariam classificados como ambiente tipo C e este foi mantido por ser também ele o ambiente de maior atenuação, ou seja, fará com que os resultados sejam mais conservadores.

Finalmente, é possível calcular a atenuação máxima de propagação ao longo da ligação ascendente:

$$L_{pmax} = P_{TX_{UE_{RB}}} - S_{gNB} - HW_{loss} - LNF_M + G_a \quad (3.9)$$

Na Equação (3.9) o parâmetro  $P_{TX_{UE_{RB}}}$  é a potência do móvel por RB,  $S_{gNB}$  é a sensibilidade do móvel,  $Cable_{loss}$  são as perdas nos cabos da gNB, o parâmetro  $LNF_M$

corresponde ao valor da margem de desvanecimento Log-Normal retirado de [22] e, por fim,  $G_a$  é igual à soma dos ganhos das antenas quer da estação base como do móvel (comboio).

Seguindo todos os requisitos dos subcapítulos anteriores, resumiu-se na Tabela 3.7 o Link Budget da ligação ascendente.

Tabela 3.7 – Link Budget da ligação ascendente.

Parâmetros	Símbolos	$f = 1900\text{MHz}$	Unidades
Largura de Banda	$BW$	10	MHz
Ritmo de Transmissão	$Rb_{RB}$	0.5	Mbps
Número de RB em UL	$N_{PRB_{UL}}^{BW(j),\mu}$	50	RB
Espaçamento entre subportadoras	$SCS$	15	kHz
Largura de Banda por RB	$BW_{RB}^{\mu}$	9	MHz
<b>Emissão (UE)</b>			
Potência do UE	$P_{TXUE}$	31	dBm
Potência do EU por RB	$P_{TXUE_{RB}}$	14.01	dBm
<b>Receção (gNB)</b>			
Densidade de Ruído Térmico por RB	$N_{RB_{UL}}$	-94.46	dBm/Hz
SINR	$SINR$	1.07	dB
Figura de Ruído	$N_{F_{gNB}}$	10	dB
Ganho de diversidade	$G_d$	18	dBi
Margem de Interferência	$I_M$	2.5	dB
Sensibilidade da BS	$S_{gNB}$	-90.89	dBm
<b>Ganhos/Perdas</b>			
Ganho da Estação Base	$G_a$	18	dBi
Atenuação no Hardware	$HW_{loss}$	3	dB
Margem de desvanecimento log-normal	$LNF_M$	2	dB
Atenuação Máxima	$L_{pmax}$	115.89	dB
Distância Máxima	$d_{max}$	7.8	km

A distância obtida é igual a 7.8 km, o valor é baixo pois a relação sinal-interferência e o ritmo de transmissão também são baixos respetivamente, 1.07 dB e 0.5 Mbps. No entanto, o valor da distância está de acordo com os valores previstos para as células FRMCS (aproximadamente 8 km).

### 3.5 Dimensionamento da Ligação Descendente (DL)

O cálculo de link budget da ligação descende (DL) tem por base o valor de atenuação máxima da ligação ascendente (UL). O objetivo principal deste cálculo é determinar qual o ritmo de transmissão de dados que poderá ser suportado em DL, sendo que os cálculos são feitos através da: atenuação máxima anteriormente calculada para UL, da potência emitida por RB e do valor da SINR na fronteira da célula FRMCS.

Para determinar a qualidade do sinal na ligação descendente é necessário saber a sensibilidade do móvel para posteriormente se calcular a potência recebida. Ao obter esta última pode ter-se uma estimativa da estação que melhor serve, um determinado trecho, em cada linha. O cálculo da sensibilidade do móvel segue a equação (3.1), no entanto, no primeiro passo para calcular a densidade de ruído térmico por RB ( $N_{RB\ DL}$ ), a figura de ruído ( $N_{FUE}$ ) a considerar é a do móvel.

Sabendo a atenuação máxima, e sensibilidade do móvel, é possível calcular a atenuação no limite da célula

$$L_{pedge} = L_{pmax} - G_a \quad (3.10)$$

Depois de obter a atenuação na fronteira da célula, o passo seguinte é calcular a relação sinal ruído no limite da célula:

$$SINR_{edge} = P_{TX\ gNB\ RB} - L_{pmax} - N_{RB\ DL} - I_M + G_a \quad (3.11)$$

Tendo em conta os passos descritos anteriormente, calculou-se o link budget para a ligação descendente, tendo sido registados os dados na Tabela 3.8

Tabela 3.8 – Link Budget da ligação ascendente.

Parâmetros	Símbolos	$f = 1900\text{MHz}$	Unidades
Atenuação máxima	$L_{pmax}$	115.89	dB
Largura de Banda	$BW$	10	MHz
Ritmo de Transmissão	$Rb_{RB}$	0.5	Mbps
Número de RB em UL	$N_{PRB\ UL}^{BW(j),\mu}$	50	RB
Espaçamento entre subportadoras	$SCS$	15	kHz
Largura de Banda por RB	$BW_{RB}^{\mu}$	9	MHz
<b>Emissão (UE)</b>			
Potência da BS por RB	$P_{TX\ gNB}$	46	dBm
Potência da BS por RB	$P_{TX\ gNB\ RB}$	29.01	dBm
<b>Receção (gNB)</b>			
Densidade de Ruído Térmico por RB	$N_{RB}$	-99.46	dBm/Hz

<b>SINR</b>	$SINR$	0.43	dB
<b>Figura de Ruído</b>	$N_{FUE}$	5	dB
<b>Ganho de diversidade</b>	$G_d$	18	dBi
<b>Margem de Interferência</b>	$I_M$	2.5	dB
<b>Sensibilidade do UE</b>	$S_{gNB}$	-96.53	dBm
<b>Ganhos/Perdas</b>			
<b>Ganho da Estação Base</b>	$G_a$	18	dBi
<b>Atenuação nos cabos</b>	$Cable_{loss}$	4	dB
<b>Margem de desvanecimento log-normal</b>	$LNF_M$	2	dB
<b>Atenuação Máxima</b>	$L_{pmax}$	134.64	dB

Como se pode observar na Tabela 3.8, o valor de atenuação máxima é igual a 134.64 dB assim sendo concluiu-se que a ligação ascendente é a mais limitadora.

### 3.6 Dimensionamento de Capacidade

O dimensionamento de capacidade é essencial para estimar a qualidade do sistema quando exposto a condições de velocidade de deslocação do terminal móvel distintas. Nas comunicações móveis ferroviárias há uma influência direta da velocidade na capacidade do sistema e por conseguinte na qualidade do sinal. Seguidamente apresenta-se um estudo da influência da velocidade e da variação do débito de pico em função da relação sinal-ruído.

#### 3.6.1 Impacto da velocidade do Comboio na SNR

A capacidade máxima está dependente da qualidade do canal rádio de uma ligação e também da proximidade à estação base. No caso das comunicações ferroviárias a velocidade de deslocação do comboio influencia o ritmo de transmissão, devido ao desvanecimento multi-percurso e a qualidade do sinal, sendo que esta começa a piorar consoante o comboio se afasta da estação base.

A velocidade terá um impacto ainda maior no FRMCS visto que, este sistema será aplicado a comboios de alta velocidade (500km/h). Neste trabalho tomou-se em consideração os resultados do estudo laboratorial da LSTI. O estudo foi feito para LTE, mas os valores foram assumidos neste trabalho dado que o FRMCS tanto poderá basear-se em LTE como em 5G NR. Em [24] são apresentados os ensaios de laboratório fornecidos por um vendedor da LSTI.

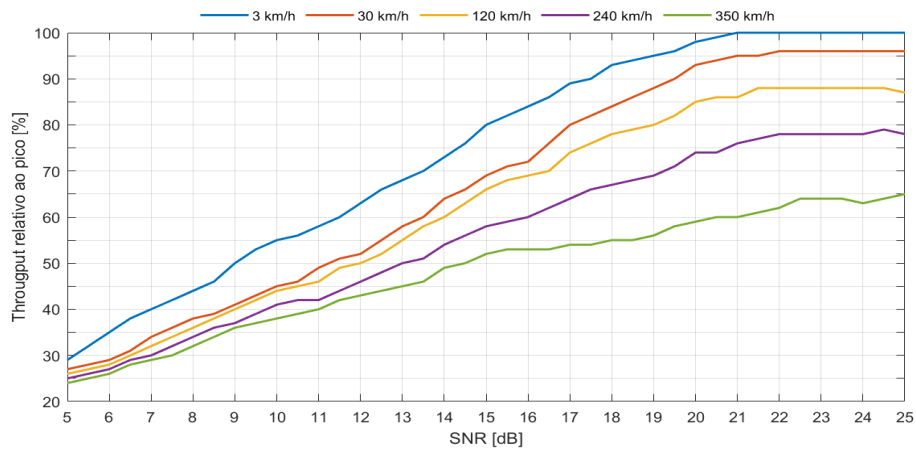


Figura 3.5 – Qualidade do sinal em função da velocidade de deslocamento do móvel [24].

Os resultados da Figura 3.5 foram obtidos em laboratório, e têm como principal objetivo ilustrar o impacto da velocidade na qualidade do sinal (SNR), bem como no ritmo binário máximo de pico. Os resultados apresentados em [24] estabelecem a comparação para 5 curvas de velocidades de circulação diferentes o valor

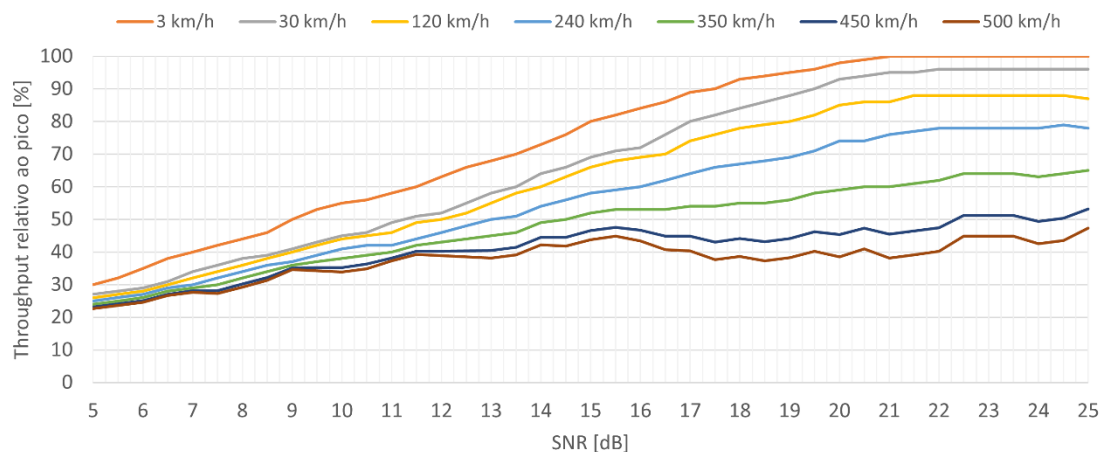


Figura 3.6 – Extrapolação da [%] de pico do ritmo de transmissão baseada nas curvas da Figura 3.5.

Com recurso ao Excel, foram traçadas as curvas de ritmo de transmissão relativo ao pico para as velocidades de 450 e 500 km/h como se pode observar na Figura 3.6.

### 3.6.2 Cálculo da SNR

A análise anterior tem que ser complementada com a aferição da qualidade do sinal recebido em função do ruído. Por isso, será necessário calcular a potência recebida em cada ponto da linha ferroviária (PK), segundo a equação (3.12)

$$P_{RX_{PK}} = P_{TX_{gNB}} - L_{pmax} - Cable_{loss} + G_a \quad (3.12)$$

Depois de obter o valor de potência em cada ponto, terá que ser feita a análise do “best server” isto é, a estação base cujo sinal chega com maior potência a um determinado

PK ( $P_{PK}(i)$ ). Para essa análise têm que se percorrer todas as potências num recebidas num determinado PK e retirar o melhor valor.

$$SNR = \frac{P_{PK}(i)}{P_{Ruído} + \sum P_{PK}(i)} \quad (3.13)$$

Como se pode observar na equação (3.13), a relação sinal ruído será o quociente da potência do *best server* recebida num PK, com o somatório de todas as potências nesse ponto juntamente com a potência do ruído ( $P_{Ruído}$ ). Dado que cada estação base utiliza diferentes RBs nos cálculos efetuados não se consideram no somatório as estações bases que são consecutivas pois estas não são interferentes entre si.

Sabendo qual o valor da relação-sinal ruído em todos os PK é possível descobrir a modulação mais adequada em cada ponto, assim sendo utilizaram-se como base os valores da Tabela 3.9 e foi feita uma extrapolação.

Segundo [16] quanto maior o valor da relação sinal-ruído mínima maior é a ordem da modulação, por conseguinte, a codificação também é melhor pois ao utilizar mais símbolos está a minimizar-se a probabilidade de existência de erro de bit (aumentando assim a BER).

Tabela 3.9 – SNR mínima para cada modulação [16].

Coding Rate (r)	SNR mínima				
	BPSK	QPSK	16QAM	64QAM	256QAM
1/3	2.2	5.2	12.7	19.2	25.2
1/2	4.0	7.0	14.5	21.0	27.0
2/3	5.2	8.2	15.7	22.2	28.3
3/4	5.8	8.8	16.3	22.8	28.8
5/6	6.4	9.2	16.7	23.2	29.2
7/8	6.4	9.4	16.9	23.4	29.4
1	7.0	10.0	17.5	24.0	30.0

A Tabela 3.9 fornece dados sobre a relação sinal ruído para cada modulação e para cada taxa de codificação desta forma é possível estimar o ritmo de transmissão máximo assumindo qualquer modulação.

### 3.6.3 Cálculo do Ritmo de Transmissão em 5G NR

A capacidade em FRMCS utilizando 5G NR depende da SNR pois esta vai ditar a modulação e a taxa de codificação. No entanto, a capacidade pode ser melhorada aumentando a largura de banda, utilizando mais antenas com MIMO (múltiplas transmissões em diferentes feixes) e com modulações de ordem mais elevada. Em [16] é definido o cálculo do ritmo máximo de transmissão que pode ser calculado de acordo com a equação (3.13):

$$Rb_{[Mbps]} = 10^{-6} \sum_{j=1}^j \left( v_{layer}(j) \cdot Q_m(j) \cdot f^{(j)} \cdot R_{max} \cdot \frac{N_{PRB}^{BW(j),\mu} \cdot 12}{T_s^\mu} \cdot (1 - OH^{(j)}) \right) \quad (3.14)$$

Como se pode observar na equação (3.14), o cálculo da capacidade tem em conta diversos parâmetros dos quais:

- $j$ : Portadora para a qual está a ser calculado o débito binário;
- $v_{layer}$ : Número de camadas (2 se MIMO 2x2 ou 4 se MIMO 4x4);
- $Q_m$ : Número de bits por símbolo derivado da modulação;
- $f$ : Fator de escalamento (toma valor 1 ou 0.75);
- $R_{max}$ : taxa de codificação máxima (depende da modulação escolhida);
- $N_{PRB}^{BW(j),\mu}$ : Número máximo de  $RB$  alocados à banda ( $BW$ ) e segundo a numerologia ( $\mu$ );
- $T_s^\mu$ : Duração média de um símbolo na *subtrama* para a numerologia ( $\mu$ );
- $OH$ : Overhead.

O tempo de símbolo pode ser calculado através da equação (3.15):-

$$T_s^\mu = \frac{10^{-3}}{14 \times 2^\mu} \quad (3.15)$$

O cálculo do ritmo de transmissão máximo é feito com base na duração média de cada *subtrama* (1 ms), esta depende do espaçamento entre portadoras utilizado (numerologia), cada *subtrama* pode transportar 14 ou mais símbolos OFDM, sendo que a duração de cada símbolo vai diminuindo quanto maior o espaçamento. No caso de se considerar um espaçamento entre portadoras ser 15 kHz transportam-se os 14 símbolos OFDM, se o espaçamento for 30 kHz transportam-se o dobro dos símbolos.

Tabela 3.10 – Cálculo da Capacidade em bandas inferiores a 1 GHz e superiores a 2.5 GHz).

Parâmetros	Símbolos	Sub-1GHz FDD	2.5-5.0GHz TDD	Unidades
Largura de Banda	$BW$	10	100	MHz
Espaçamento	$\Delta f^\mu$	15	30	kHz
Número de RB	$N_{PRB}^{BW(j),\mu}$	52	273	RB
Modulação DL	$Q_m^{UL}$	6	6	Bits/Símbolo
MIMO DL	$v_{layer}$	2	4	Beams/TRX
Fator de Escalamento DL	$f^{DL}$	1	0,74	-
Fator de Escalamento UL	$f^{UL}$	1	0,23	-
Tempo de símbolo	$T_s^\mu$	71.43	35.76	$\mu s$
Numerologia	$\mu$	0	1	-
Taxa de Codificação	$R_{max}$	0.93	0.93	-
Ritmo Binário DL	$Rb_{DL}$	111.79	1737.26	Mbps
Ritmo Binário UL	$Rb_{UL}$	44.85	108.31	Mbps

Os resultados presentes na Tabela 3.10 encontram-se em formato Excel nos anexos de *software* deste projeto. Os valores apresentados na Tabela 3.10 consideram que o canal físico PDCCH utiliza toda a largura de banda do sistema para frequências inferiores a 1 GHz e apenas metade da banda para frequências, para além disso existe apenas um DM-RS. Os canais de sincronismo e *broadcast* não são contemplados nos cálculos da Tabela 3.10.

No subcapítulo 2.4.1 foi visto que a largura de banda necessária para sistemas baseados em 5G NR varia entre 50MHz e 100MHz para as numerologias 0, 1 e 2. Portanto, assumindo as novas frequências do FRMCS na ordem dos 2 GHz, tendo 100MHz de largura de banda, a modulação 256-QAM com 8 bits por símbolo OFDM e MIMO 4x4 obtém-se um ritmo máximo de 1.80 Gbps em DL e 0.108 Gbps em UL. Se por outro lado a simulação for feita para as bandas coexistentes com o GSM-R, inferiores a 1 GHz, considerando 10MHz de largura de banda, mantendo a modulação e utilizando MIMO 2x2 obtém-se um ritmo binário máximo de 111 Mbps em DL e 42 Mbps em UL.



## 4 Casos de Estudo

### 4.1 Introdução

Para a análise do modelo de propagação e da aplicabilidade do FRMCS à ferrovia foi considerada a informação de medidas reais da linha ferroviária de Cascais e da linha do Oeste. Estas informações permitirão obter uma estimativa do nível de sinal necessário tendo em conta o número de estações base, a informação geográfica e morfológica do terreno envolvente.

Neste capítulo será feita a descrição da abordagem utilizada na elaboração da ferramenta de predição de cobertura e capacidade. Para tal aplicar-se-ão todos os algoritmos de predição de cobertura e cálculo de capacidade descritos no capítulo 3.

### 4.2 Descrição do problema/Fluxograma

Para compreender as variáveis a ter em conta no estudo/criação desta ferramenta de simulação foi elaborado o fluxograma da Figura 4.1.

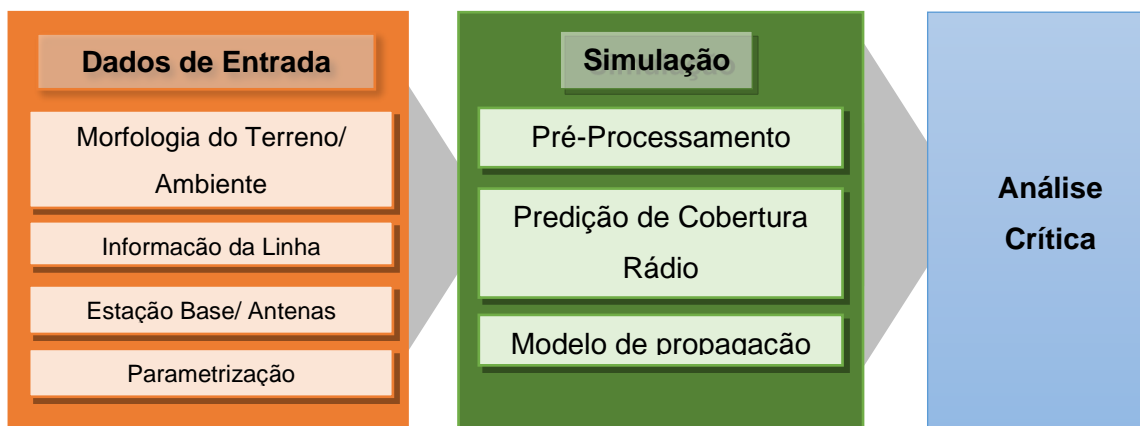


Figura 4.1 – Fluxograma de simulação.

Como se pode observar na Figura 4.1, existem três passos fundamentais na produção de resultados: a recolha de dados de entrada, o momento da simulação e a análise dos resultados obtidos.

O simulador criado no âmbito deste projeto foi implementado com recurso a Matlab e o algoritmo implementado permite: efetuar cálculos da atenuação de percurso segundo o modelo IEEE 802.16 SUI, calcular a sensibilidade dos recetores, fazer a seleção da estação base que melhor serve uma determinada área (tendo em consideração a melhor gestão dos recursos entre células), gerar uma estimativa da qualidade do sinal (SNR)

em cada ponto da linha férrea e, permite efetuar a análise e cálculos de capacidade do sistema baseados em 5G NR.

A simulação é dinâmica pois permite receber a parametrização da linha férrea em ficheiros Excel e, através desses ficheiros, retirar os dados fundamentais aos cálculos como: a altura das antenas, a localização em termos de PK, as perdas nos cabos, o ganho das antenas da estação base em cada PK e valores de potência recebida e atenuação reais.

### 4.3 Cenários de Estudo

O primeiro cenário de estudo simulado neste trabalho foi a Linha de Cascais cuja extensão são 25.5 km desde a estação de Cascais até à estação do Cais do Sodré. Através dos ficheiros de medidas, disponibilizados pela Solvit, foi possível fazer simulações de cobertura e capacidade, com informação proveniente de 4 estações (setores A e B) de um total de 18 estações que compõem esta linha.



Figura 4.2 –Linha ferroviária de Cascais.

Na Figura 4.2 assinalaram-se as estações da linha de Cascais cuja informação foi disponibilizada, pela Solvit, no âmbito deste projeto. No entanto, das 8 estações que estão representadas não se consideraram os dados das estações de Santos (PK 0+947), Belém (PK 4+861) e Algés (PK 7+805). A estação de Santos não tem uma estação base associada, mas sim, um repetidor, então o termo de comparação não seria o mesmo das restantes. E no caso de Belém e Algés não havia dados disponíveis.

A menor distância entre estações base é de 947 metros do Cais do Sodré (PK 0+000) a Santos e a maior distância é de Alcântara-Mar (PK 2+668) a Algés, cerca de 5.14 km.

O segundo cenário de estudo utilizado neste trabalho foi a Linha do Oeste cuja extensão é de 84.7 km desde a estação de Meleças (PK 20+320) até à estação das Caldas da Rainha (PK 105+011). Como anteriormente referido, através dos ficheiros de predição disponibilizados, pela Solvit para cada estação base setores A e B, foi possível trabalhar com informação proveniente de 22 estações. A única estação base de setor único é a estação base das Caldas da Rainha.



Figura 4.3–Linha ferroviária do Oeste.

Na Figura 4.3 destacaram-se as estações da linha do Oeste cuja informação foi fornecida no âmbito deste projeto. A menor distância entre estações base é de 2km de Runa à passagem de nível localizada no PK 61+844. A maior distância é de Alcainça (PK 35+574) a Jerumelo (PK 41+780) cerca de 6.2 km em contraste com este troço têm-se o troço entre Ramalhal (PK 71+373) e a passagem de nível (PN) ao PK 73+552 com uma distância de apenas 2.2 km entre estações. No geral a distância entre estações está compreendida entre 3 a 4 km.

#### 4.4 Calibração do modelo IEEE 802.16 SUI Model

Com a finalidade de comprovar a possibilidade da aplicação do modelo IEEE 802.16 SUI ao cenário em estudo foram comparadas as curvas de atenuação calculada com base neste modelo, com as curvas de outros dois modelos de propagação nomeadamente, o modelo de Okumura-Hata e o modelo de espaço livre e ainda com uma curva de medidas reais.

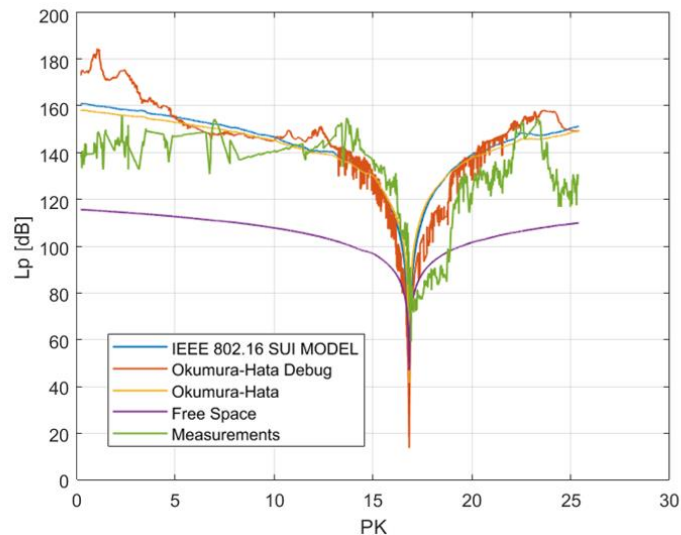


Figura 4.4 – Atenuação no PK 17 setor A e B.

Como se pode observar na Figura 4.4, os resultados obtidos ao nível da atenuação para o modelo IEEE 802.16 estão bastante idênticos aos resultados que se obtêm com o modelo de Okumura-Hata. Para compreender o comportamento da atenuação real foi necessário compara as curvas com as medidas reais (Measurements) e pode verificar-se que as curvas seguem um comportamento idêntico o que comprova que o modelo é aplicável ao troço em causa.

#### 4.5 Simulação de Cobertura

Para simulação de cobertura foi considerada uma potência de emissão de 46 dBm, a largura de banda útil do sistema são 9 MHz, onde são considerados 50 RBs úteis. A potência é igualmente distribuída por todos os RBs e é considera a utilização de diferentes RBs entre estações base numa tentativa de mitigação da interferência entre estações.

##### 4.5.1 Potência Recebida

Ao efetuar a análise de propagação através o modelo IEEE 802.16 SUI obtiveram-se os valores máximo de atenuação de propagação em cada PK da linha de Cascais,

simulando assim a atenuação que o recetor irá sentir ao deslocar-se ao longo da linha. Esse valor de atenuação possibilitou o cálculo da relação sinal-interferência, ao longo da linha.

Considerando a ligação descendente (DL), é necessário saber qual a estação base que melhor serve cada ponto da linha ferroviária e por consequência, a qualidade de sinal para cada PK. Quanto maior for o número de comboios por célula maior será a interferência gerada e isso traduzir-se-á numa degradação da relação sinal-interferência ao longo da linha (SINR).

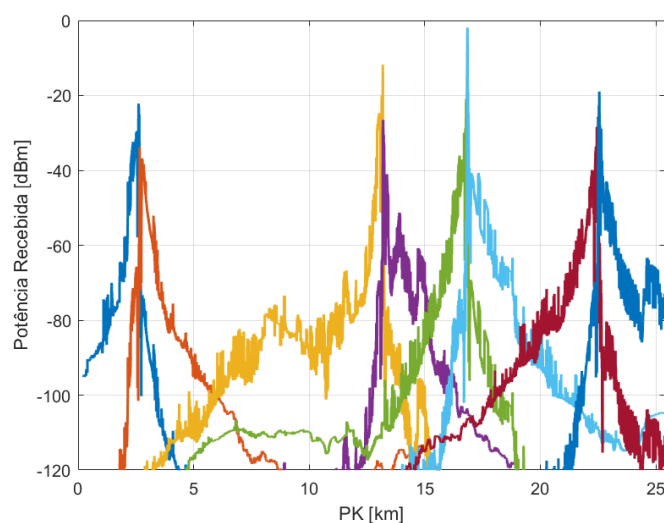
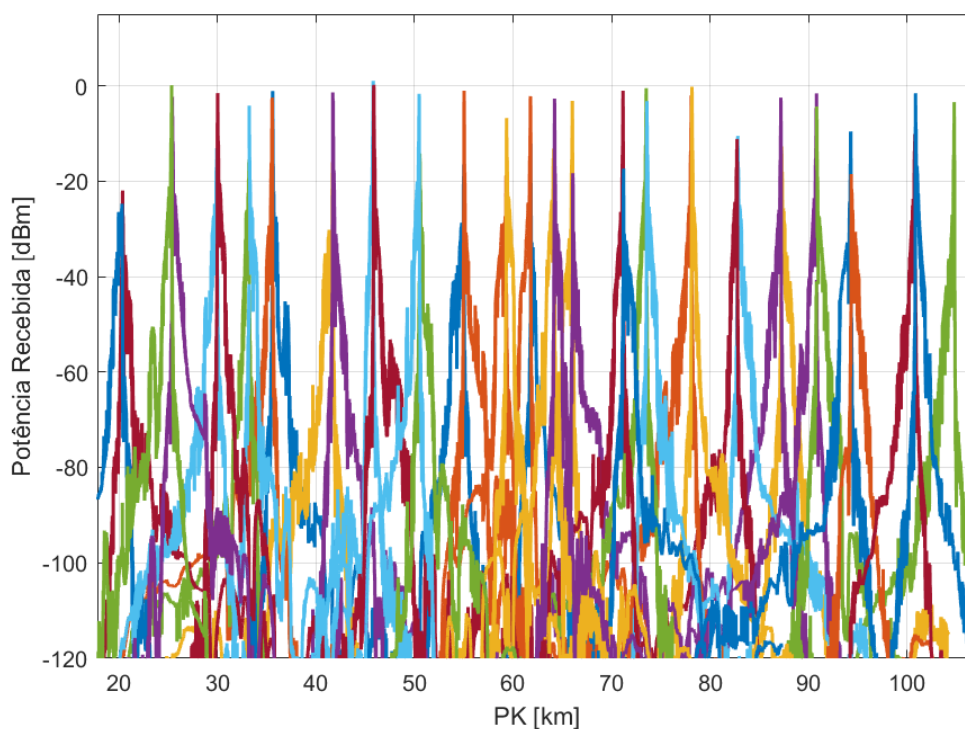


Figura 4.5 – Potência Recebida ao longo da linha de Cascais para  $f=1900\text{MHz}$ .

Como se pode observar na Figura 4.5, a potência recebida para uma frequência de 1900 MHz apresenta, em média, valores elevados nas proximidades de cada estação base, sendo que o valor mais baixo é de -120 dBm. Pode também observar-se que entre a estação de Alcântara-Mar (PK 2+668) e Paço de Arcos (PK 13+206) há um decaimento do nível de potência devido ao facto de não ter sido considerado o repetidor de Santos e, também, por não terem sido disponibilizados dados de Belém e de Algés. A partir de Paço de Arcos não existem zonas de falta de cobertura, sendo que a zona onde a potência recebida é mais baixa, aproximadamente -88 dBm, situa-se entre o PK 17 e São João do Estoril (PK 22+517). No entanto, este fator é influenciado pela falta de dados das estações neste troço.

Seguidamente foi realizada a simulação da potência recebida para as estações base da Linha do Oeste, mantendo as mesmas condições de simulação referidas no início deste capítulo.



*Figura 4.6 - Potência recebida ao longo da Linha do Oeste para  $f=1900\text{MHz}$ .*

Na Figura 4.6, pode verificar-se muito maior densidade de amostras visto que o número de estações base aumenta de 4 para 22 estações. Quanto ao comportamento da distribuição de potência pode verificar-se que é idêntico em termos de valores máximo e mínimos ao da Figura 4.5

Para realizar o cálculo da relação sinal-ruído, e sabendo que esta representa o quociente entre o sinal recebido num determinado ponto, com o somatório do ruído e dos sinais recebidos nesse mesmo ponto. Como tal, foi elaborado o histograma das estações que melhor servem determinados pontos das linhas ferroviárias em estudo.

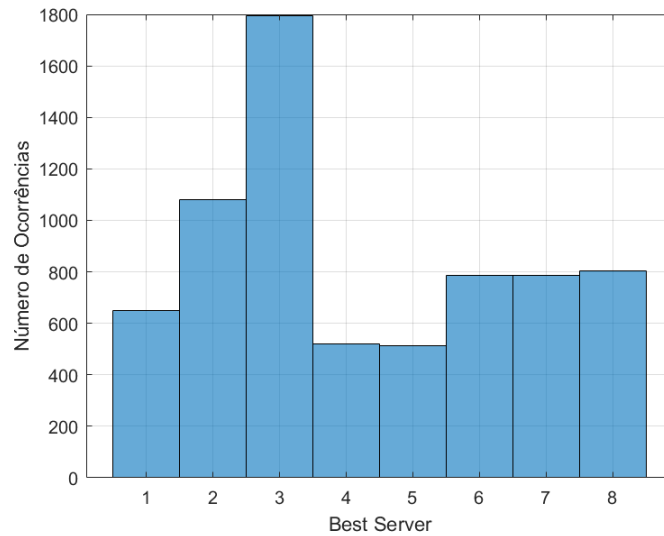


Figura 4.7 – Histograma de Best Server da linha de Cascais.

Na Figura 4.7 começou por traçar-se o histograma da Linha de Cascais, pode ver-se uma discrepância entre a estação de Paço de Arcos cujo número de ocorrências é muito superior a qualquer uma das restantes estações. Para conseguir compreender as ocorrências do histograma traçou-se o gráfico de potências recebida dos best server.

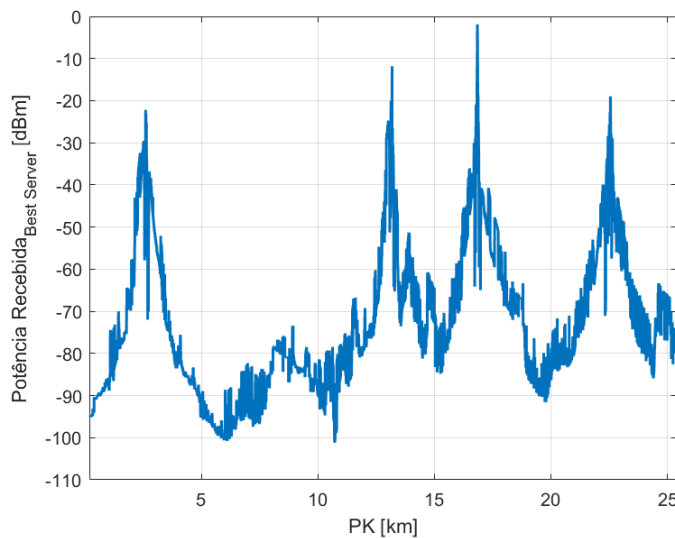


Figura 4.8 – Potência recebida dos Best Server da linha de Cascais.

Na Figura 4.8 encontra-se a representação da potência recebida pelos best server ao longo da linha, referentes às ocorrências do gráfico Figura 4.7, neste último a terceira barra do histograma pertence à estação de Paço de Arcos (setor A) do PK 13 é a que apresenta mais ocorrências. Pode também observar-se que é a que tem uma potência recebida maior -84 dBm.

Foi traçado o mesmo histograma para análise de ocorrências de potência recebida para a linha do Oeste (Figura 4.9).

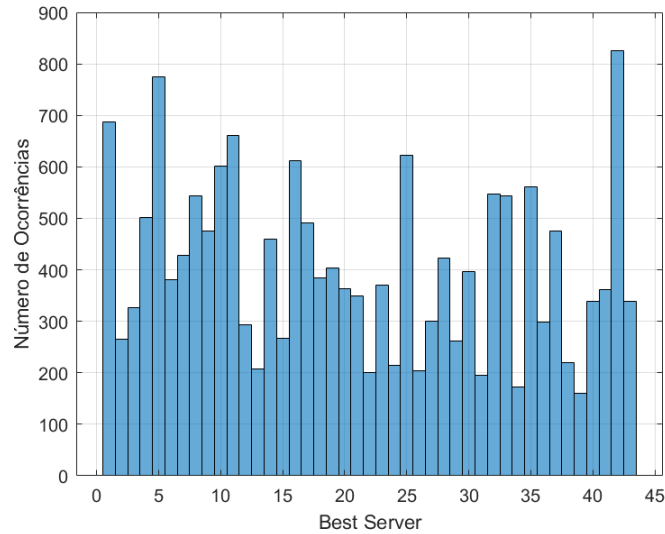


Figura 4.9 – Histograma de Best Server da Linha do Oeste.

Na Figura 4.9, pode verificar-se um maior número de ocorrências nas estações dos extremos, nomeadamente, Alcainça (PK 35+574) e do lado oposto Caldas da Rainha (PK 105+011) e Óbidos (99+597) a última posição.

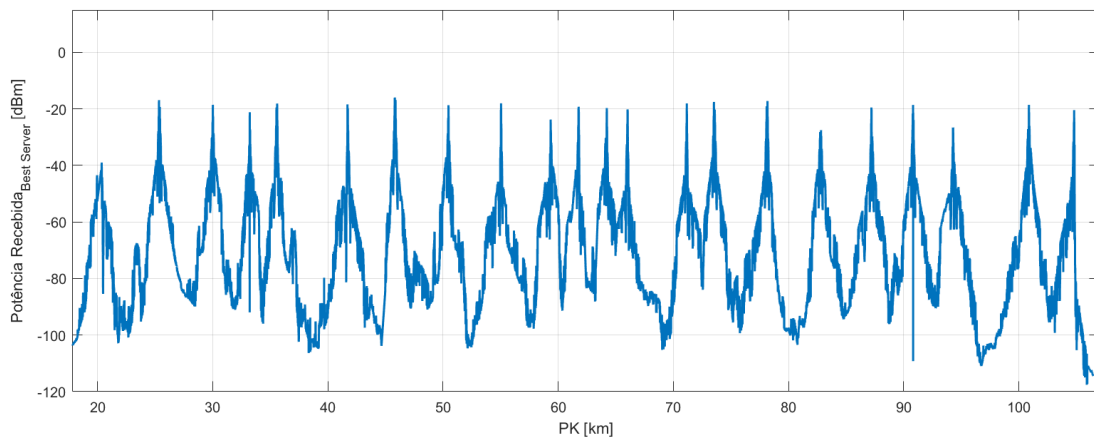


Figura 4.10 – Potência recebida dos Best Server da linha do Oeste.

Como se pode observar na Figura 4.10, as potências dos best servers estão compreendidos nos -100 dBm, valor que já era esperado devido aos cálculos realizados nos capítulos iniciais. Não foi considerado o valor de -117 dBm da última estação base porque só está a ser contabilizado o setor A, logo o decaimento da potência recebida ultrapassa acaba por ser mais rápido pois não tem a contribuição do setor B.

## 4.5.2 Simulação da Relação Sinal-Ruído

Os valores de SNR que seguidamente se apresentam foram obtidos pelo método descrito no capítulo 3.6.2 e os resultados para a linha de Cascais encontram-se na Figura 4.11:

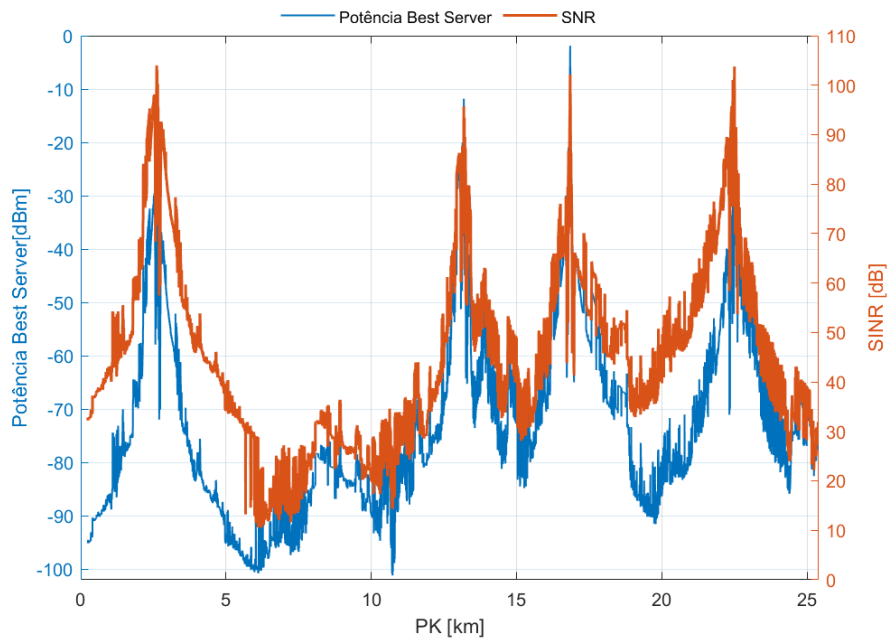


Figura 4.11 – Relação Sinal-Ruído para  $f=1900\text{MHz}$  ao longo da linha de Cascais.

A qualidade do sinal é inferior no troço compreendido entre os PK 5 e 17 pois como já havia sido explicado não foi possível considerar os valores das estações compreendidas pelo meio.

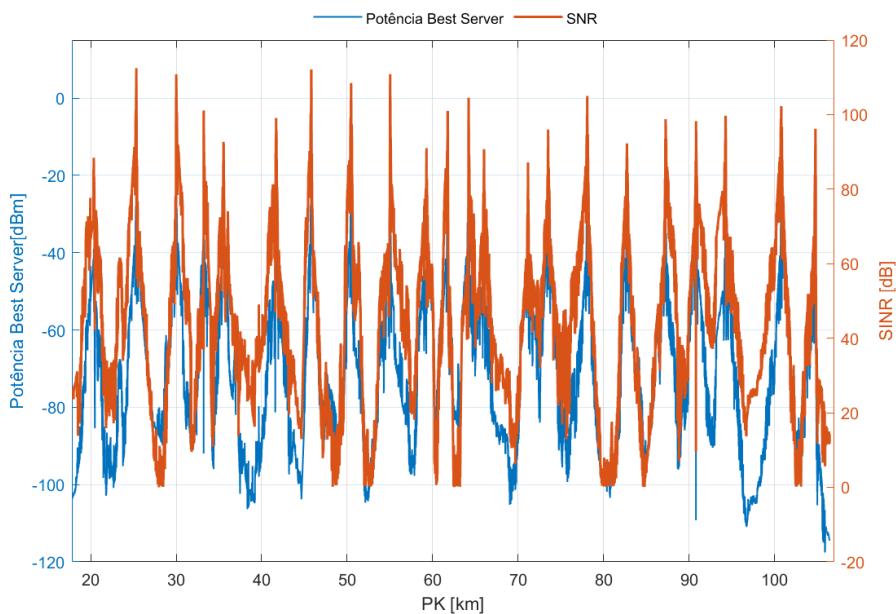


Figura 4.12 – Relação sinal-ruído para  $f=1900\text{MHz}$  ao longo da linha do Oeste.

Quando à qualidade do sinal na linha do Oeste, pode verificar-se através da Figura 4.12 que, próximo do PK 69 entre as estações de Torres Vedras e Ramalhal e, aproximadamente no PK 80 (Outeiro e Camarão), tanto a potência recebida como a SNR apresentam valores baixos, isto deve-se ao facto de os dois troços terem uma distância física cerca de 6 km, a maior distância física entre estações na Linha do Oeste. Ainda no seguimento desta análise, ao PK 96 entre S. Mamede e Óbidos pode ver-se uma diminuição nos valores de potência recebida e SNR dado que não foram contabilizados os dados da estação que está compreendida no meio das duas anteriores.

Nas simulações para a frequência de 1900 MHz, o sinal descrese mais rápido, no entanto, as interferentes decrescem igualmente rápido. Por isso, são se nota uma diferença acentuada na relação sinal ruído.

#### 4.6 Simulação de capacidade

Tendo em conta o valor de relação sinal ruído obtido em cada ponto da linha de Cascais foram calculados os ritmos máximos de transmissão em função da SNR em cada PK. Após obter os ritmos de pico foram retirados os valores de ritmo de transmissão tendo em conta as percentagens de pico determinadas no capítulo 3.6.1.

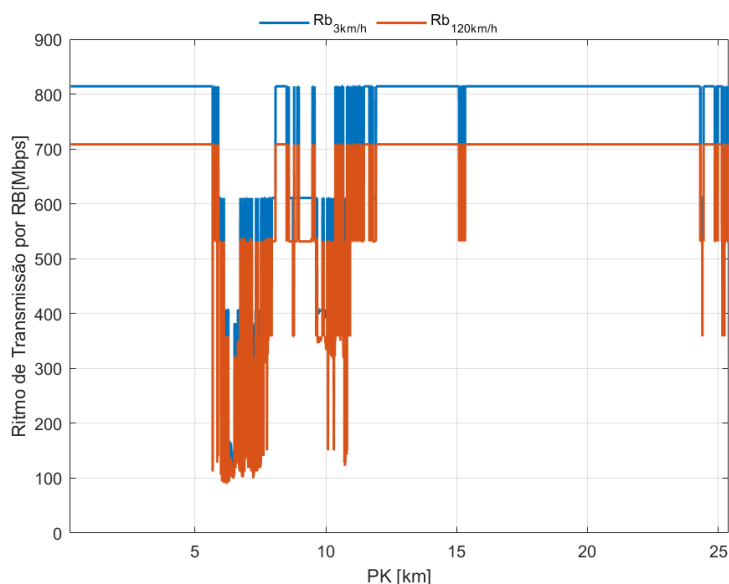


Figura 4.13 – Ritmo de transmissão por RB para  $v=3\text{km/h}$  e  $v=120\text{km/h}$  da Linha de Cascais.

Na Figura 4.13, obtida para uma largura de banda de 10 MHz, pode verificar-se que para uma velocidade de deslocação do móvel de 3 km/h o valor de ritmo de transmissão máximo é de 814 Mbps e para a velocidade de 120 km/h 708 Mbps. No entanto e dado que para a linha de Cascais a amostra a nível de pontos era inferior à linha do Oeste os

valores de ritmo de transmissão acabam por não ser tão representativos como os que a seguir se apresentam.

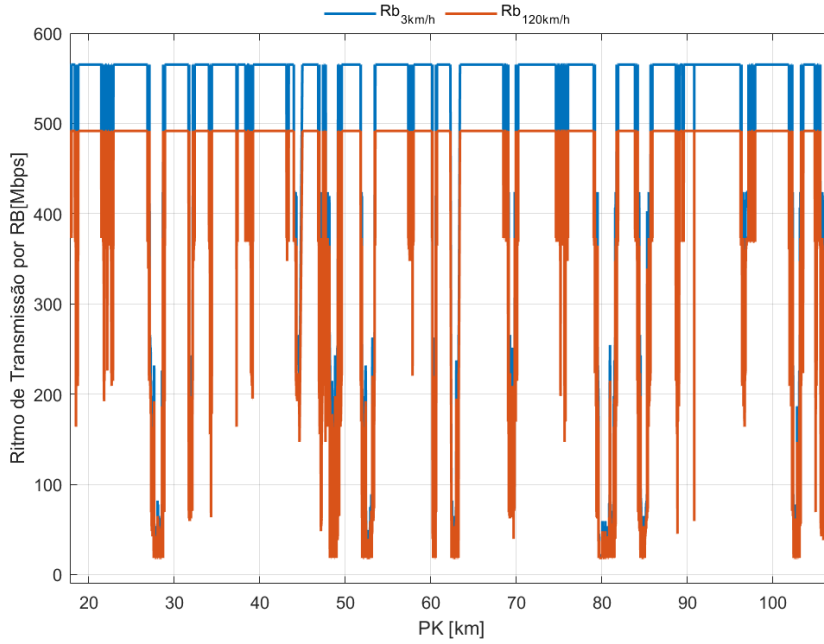


Figura 4.14 – Ritmo de transmissão por RB para  $v=3km/h$  e  $v=120km/h$  da Linha do Oeste.

Recorrendo aos métodos anteriores procedeu-se ao cálculo do ritmo de transmissão máximo por velocidade para a linha do Oeste, como se pode observar na Figura 4.14.

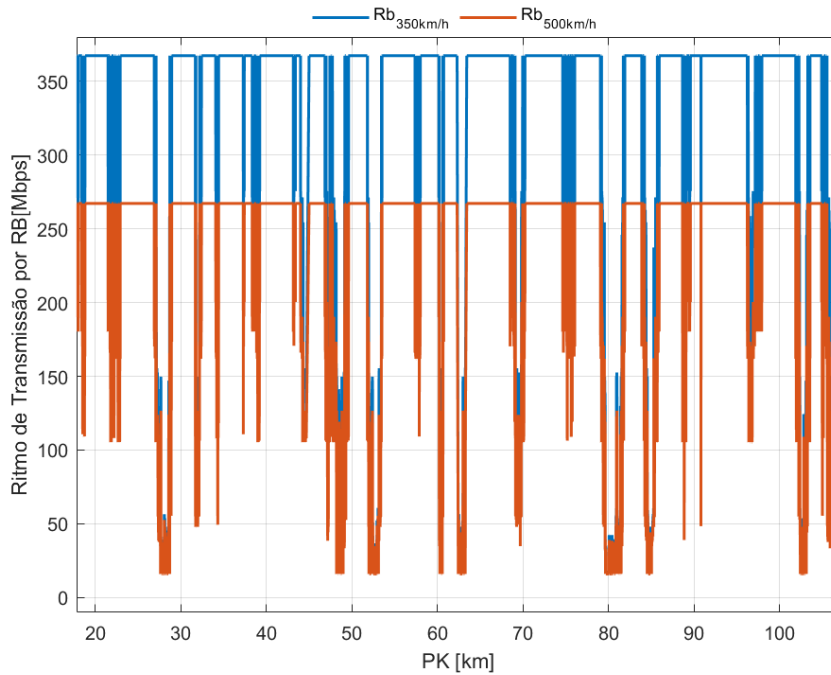


Figura 4.15 – Ritmo de transmissão por RB para  $v=350km/h$  e  $v=500km/h$  da Linha do Oeste.

Para além das simulações de 3 km/h e de 120 km/h da Figura 4.14, optou por simular-se para velocidades maiores, tais como, 350 km/h e 500 km/h visto que o FRMCS prevê aplicar-se aos comboios de alta velocidade como introduzido nos capítulos iniciais. No caso da velocidade igual a 3 km/h, na Linha do Oeste registou-se uma queda do ritmo de transmissão máximo face àquele que tinha sido obtido para a linha de Cascais, neste caso o ritmo obtido foi de 560 Mbps. Para a velocidade de 120 km/h o ritmo binário máximo é 491 Mbps. Nos casos menos favoráveis, ou seja, quando a relação sinal ruído é mais baixa obtiveram-se 80 Mbps, este valor representa o limite das células na zona de fronteira onde a relação sinal ruído é mínima. Ainda assim este valor é bastante aceitável pois permite suprir os requisitos do capítulo 3.2.3 referentes às aplicações de vídeo (consideradas críticas).

Na Figura 4.15 observam-se os resultados para uma velocidade igual a 350 km/h onde o ritmo de transmissão máximo foi 367 Mbps e para uma velocidade de deslocação do móvel de 500 km/h o ritmo obtido foi 267 Mbps. Repetindo a análise da figura anterior, nos casos menos favoráveis, o ritmo de transmissão mínimo é igual a, aproximadamente, 16 Mbps. Este valor não se apresenta aceitável para zonas onde a ocupação da via-férrea seja mais densa (mais comboios por célula) dado que não cumpre os requisitos do capítulo 3.2.3 das linhas de elevada densidade, também não cumpre com os requisitos das aplicações de vídeo (consideradas críticas).

De forma a observar mais pormenorizadamente o comportamento do ritmo de transmissão foi feito um gráfico apenas entre duas antenas para as velocidades 350 km/h e de 500 km/h, no troço entre Outeiro (PK 78+166) e Camarão (PK 82+840).

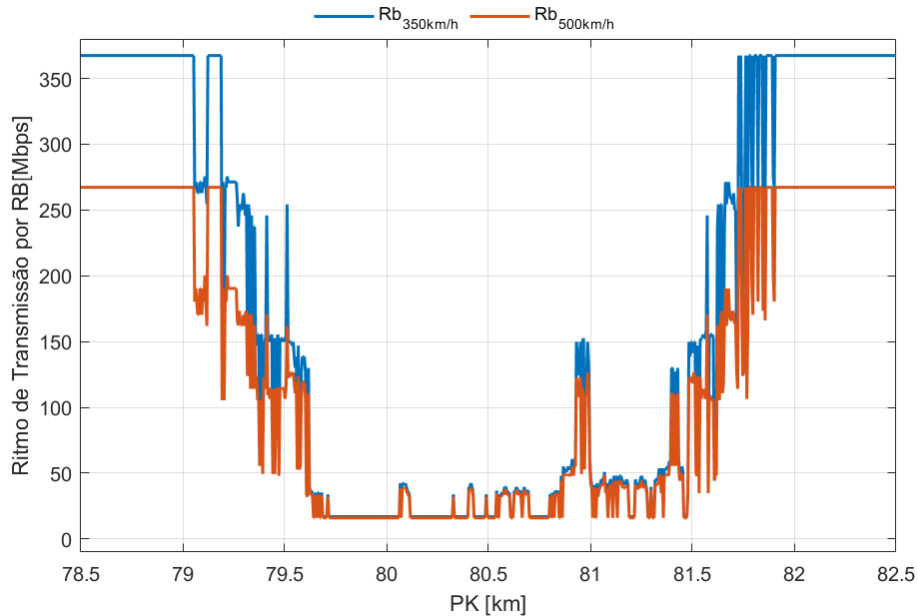


Figura 4.16 – Ritmo de transmissão em função da distância entre o Outeiro e Camarão.

Verifica-se que a distância entre as estações base é superior a 4 km, os melhores resultados estão no PK correspondente à estação base de ambos os locais e os piores resultados estão na zona mais afastada das duas antenas, cerca de 2 km da estação base de Outeiro. Nos locais piores o mínimo ritmo de transmissão é 16 Mbps, no entanto, este valor está claramente condicionado pela condição de propagação neste troço.



Figura 4.17 – Troço entre Outeiro e Camarão.

Como se pode observar na Figura 4.17, o troço entre Outeiro e Camarão apresenta um traçado curvo com alguma elevação, assim sendo pode concluir-se que a geometria do terreno pode estar a influenciar a propagação ao longo do troço. Nos 500 metros compreendidos entre o PK 79 e o PK 79.5 há um aumento do ritmo por volta dos 100 Mbps e tal pode dever-se ao facto da antena de Outeiro não estar em linha de vista com esse local, daí aumentar um pouco a SNR nesse local.



## 5 Conclusões

### 5.1 Trabalho Desenvolvido

O objetivo traçado para esta dissertação era o estudo de um novo sistema de comunicações móveis ferroviárias (FRMCS) e da possibilidade de reaproveitamento dos recursos existente para o GSM-R durante a implementação deste novo sistema. Para tal, foi necessário saber as características desejadas e os desafios que este sistema terá de suprir, quer ao nível do utilizador quer ao nível da sua arquitetura.

O trabalho começa pelo estudo das características das comunicações ferroviárias, a descrição dos diferentes níveis do ETCS e de que forma estes se refletem nas restantes ferrovias europeias. Foi feita uma pesquisa profunda a cerca dos requisitos do GSM-R, o seu modo de operação, o funcionamento da arquitetura e as funções dos seus módulos. Posteriormente, foram abordadas as novas bandas de frequência e de que forma as alterações espectrais podem alterar o número de recursos alocados a cada utilizador no tempo. Foram então assumidas duas bandas: 900 MHz e 1900MHz, sendo que o modelo de propagação utilizado nas simulações teria que cobrir este leque de frequências.

O modelo de propagação escolhido foi o modelo IEEE 802.16 SUI que tem uma aceitação alargada a nível espectral e abrange as bandas anteriormente referidas. Assim sendo, o desafio passou por criar um simulador que tivesse como resultados os valores de cobertura e de capacidade necessários para tirar conclusões a cerca do planeamento ferroviário para este novo sistema FRMCS.

O simulador implementado recebeu dados reais de planeamento das linhas de Cascais e do Oeste. As simulações consideram os cálculos em TDD e sendo o setor ferroviário um meio de suporte a aplicações críticas, o fator de carga considerado em todas as simulações foi de 100% uma vez que, o comboio tem que estar em contante contacto com a informação de sinalização no terreno.

Foram analisados diferentes cenários de propagação para diferentes frequências uma vez que, a velocidade de circulação dos comboios tem uma influência direta no número de recursos alocados para cada utilizador, assim sendo quanto maior as velocidades menos comboios são suportadas pela mesma célula.

## 5.2 Conclusões Finais

Tendo em conta os resultados extraídos da ferramenta de simulação, pode assumir-se que o FRMCS é uma tecnologia bastante promissora dado que se baseia em 5G e pode operar em diferentes modos. Para além disso, tem como vantagem operar em diferentes frequências, o que por um lado permite um aproveitamento do equipamento existente e um aumento da capacidade por célula.

O trabalho desenvolvido permitiu duas abordagens ao tema do FRMCS. Por um lado, foi possível resumir algumas das principais características a nível teórico como a possibilidade de coexistência com a tecnologia GSM-R numa fase de migração, a introdução de aplicações mais críticas e a forma como se pretende que estas tenham em conta os ritmos de transmissão. Por outro lado, a componente de simulação revelou alguns desafios nomeadamente a escolha dos modelos de propagação visto que esta já teria de contabilizar bandas de frequência de ordem superior, bem como a implementação dos esquemas de reutilização de resource blocks. A interferência é contornada com a técnica de separação dos RBs, duas estações base consecutivas não interferem uma com a outra porque não estão a utilizar os mesmos RBs.

A sensibilidade da estação base obtida nas simulações (-90 dBm) vai de encontro à sensibilidade estimada na literatura para o FRMCS. Os valores de potência recebida mantiveram-se nos -100 dBm e os valores da SNR no limite da célula não foram inferiores a 10 dB, tal como esperado. Pode também concluir-se que as diferentes taxas de codificação utilizadas, em combinação com diferentes modulações, fazem com que o FRMCS seja uma tecnologia versátil e com grande adaptabilidade ao setor ferroviário.

No decorrer do trabalho obtiveram-se valores promissores, mas que ainda podem ser alvo de melhorias. Para uma célula de aproximadamente 7 km o FRMCS conseguir-se-á atingir no mínimo 80 Mbps para uma velocidade de deslocação igual a 3 km/h. No caso das velocidades de deslocação superiores, como é o caso dos 500 km/h as simulações revelam alguma fragilidade do sistema no que toda a linhas com elevada densidade de comboios por célula, dado que seria necessário um valor superior a 29 Mbps e apenas se atingiram 16 Mbps em simulação.

O recurso a dados reais aplicados a GSM-R revelou-se uma abordagem aceitável para o estudo do FRMCS e verificou-se que é possível reutilizar a maioria dos sites GSM-R existentes. No entanto, seria interessante poder comparar estas simulações a outras realizadas no mesmo âmbito.

### **5.3 Trabalhos Futuros**

Os cenários de operação do FRMCS ainda não estão bem definidos, seria desejável comparar os resultados obtidos com medições reais, feitas com equipamentos a comunicar nestas novas bandas.



## Referências

- [1] “ETSI - Railway Telecommunication | Rail Communications Standards | FRMCS,” ETSI, 2019. [Online]. Available: [www.etsi.org/technologies/rail-communications](http://www.etsi.org/technologies/rail-communications).
- [2] “ETCS - UIC - International union of railways.,” UIC - International union of railways., 2020. [Online]. Available: <https://uic.org/rail-system/ertms/etcs>. [Acedido em 13 Dezembro 2019].
- [3] L. Pushparatnam, T. Taylor, D. Mandoc e K. Konrad, “GSM-R Procurement and Implementation Guide,” UIC, 2009.
- [4] D. Schattschneider, “Spectrum Aspects for FRMCS,” *UIC FRMCS GLOBAL CONFERENCE*, Maio 2019.
- [5] F. Coursant e I. Wendler, “Architecture and Technology Workgroup Session 4 - FRMCS Specification & Standardization Process,” *UIC FRMCS GLOBAL CONFERENCE*, Maio 2019.
- [6] N. Cota, A. Serrador, P. Vieira, J. P. Neves e A. Rodrigues, “An Enhanced Radio Network Planning Methodology for GSM-R,” em *Conftele 2013 - 9th edition of the Conference on Telecommunications*, Castelo Branco, 2013.
- [7] J. Soure, “Implementação do Sistema GSM-R na Rede Ferroviária Nacional - Projeto-piloto,” Coimbra, 2013.
- [8] D. Mandoc e J.-M. Evangelou, *FRMCS: More than just a successive replacement for GSM-R*, 5 Maio 2020.
- [9] FRMCS Functional Working Group, “Future Railway Mobile Communication System User Requirements Specification Version 4.0.0,” Janeiro 2019.
- [10] E. R. Agency, “Appendix A to Technical Specifications "Operation and traffic management",” 2015.
- [11] ETSI, “ETSI TR 103 459 V1.1.1 (2019-01) - Rail Telecommunications (RT); Future Rail Mobile Communication System (FRMCS); Study on system architecture,” Sophia Antipolis Cedex - FRANCE, 2019.

- [12] Electronic Communications Committee, "ECC Report 294," *Assessment of spectrum needs for future railway communications*, 2019.
- [13] ETSI, "5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 38.104 version 15.6.0 Release 15)," *ETSI TS 138 104 V15.6.0*, 7 2019.
- [14] H. Holma, A. Toskala e T. Nkamura, *5G Technology: 3GPP New Radio*, Jonh Wiley & Sons Ltd., 2020.
- [15] ETSI, "ETSI TS 138 300 V15.8.0 (2020-01) - 5G; NR; Overall description; 3GPP TS 38.300 version 15.8.0 Release 15," ETSI, Sophia Antipolis Cedex - FRANCE, 2020.
- [16] R. Atri e S. Malik, "5G New Radio Technology Introduction And Its Throughput Capabilities," *5G New Radio - Next Generation of Mobile Broadband*, pp. 2-3.
- [17] Nokia, "A new platform for rail communications – adopting 5G for railways," Finlândia, 2019.
- [18] Electronic Communications Comittee, "Harmonised use of the paired frequency bands 874.4-880.0 MHz and 919.4-925.0 MHz and of the unpaired frequency band 1900-1910 MHz for Railway Mobile Radio (RMR)," *ECC Decision (20)02*, 20 Novembro 2020.
- [19] Electronic Communications Comittee, "Co-existence between Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) in the frequency range 1900-1920 MHz and other applications in adjacent bands," *ECC Report 314*, 21 Maio 2020.
- [20] ETSI, "ETSI TR 103 554-1 V1.2.1 (2019-01) - Rail Telecommunications (RT); Next Generation Communication System; Radio performance simulations and evaluations in rail environment (LTE)," Sophia Antipolis Cedex - FRANCE, 2019.
- [21] ETSI, "ETSI TS 138 104 V.15.5.0 (2019-05)," *5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception 3GPP TS 38.104 version 15.5.0 Release 15*, pp. 48-53, Maio 2019.
- [22] A. 3GPP, "ATIS.3GPP.38.817-02.V1580," *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; General aspects for Base Station (BS) Radio Frequency (RF) for NR*, p. 48, Junho 2020.

- [23] P. Imperatore, E. Salvadori e I. Chlamtac, "Path Loss Measurements at 3.5 GHz: A Trial Test WiMAX Based in Rural Environment," Italy, 2004.
- [24] J. Robson, "The LTE/SAE Trial Initiative: Taking LTE/SAE from specification to rollout," Abril 2009.



## Anexo A – Características da Antena Sencity Rail da HUBER+SUHNER

# SENCITY® Rail



### Features:

- Railway rooftop antenna for GSM 900, GSM 1800, GSM 1900, UMTS, LTE, WiFi and WiMAX 2.4, 3.5, 5.3 and 5.8 GHz bands
- Rugged design, meets EN 50155 railway standard
- Fire retardant acc. to DIN 5510-2, BS 6853, NF F16-101/102, EN 45545-2
- Works also on non-metallic surfaces
- Split installation support
- Versional grounding kit available
- Versional conduit support kit available to protect the cabling

## Specifications

Electrical data							
Frequency (MHz)	694 to 790	790 to 960	1350 to 1710	1710 to 2700	2700 to 3300	3300 to 4900	4900 to 6425
VSWR	2.0	1.5	2.2	1.5	1.5	1.7	1.5
Gain (dBi)	5	5	76	6	8.5	7	7

General data	
Nominal impedance ( $\Omega$ )	50
Polarisation	vertical
Composite power max. (W)	100

Mechanical data	
Dimensions (height × width × depth)	90 × 100 × 256 mm (3.54 × 3.94 × 10.08 in)
Weight	0.8 kg (1.76 lbs)
Connector	N (female)

Environmental data	
Environment	outdoor
Operation temperature (°C)	-45 to 85
RoHS 2011/65/EU	compliant
IP rating	IP66/IP68

Material data	
Radome colour	RAL 7043 (dark grey)
Radome material	ASA (acrylic ester-styrene-acrylonitrile)
Back/base plate material	Aluminium

## Ordering information

Description	Item no.	Version
1399.17.0122	84071876	as above
1399.99.0120	84071811	with additional embedded GPS & LNA
1399.99.0121	84071812	with additional embedded GPS & LNA, lower temperature limit -55 °C