



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações e de Computadores



LTE-R

Comunicações Móveis Ferroviárias de Banda Larga

GRACIANO PEDREIRA TEIXEIRA

(Licenciado em Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações e de Computadores)

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações**

Orientador:

Prof. Nuno António Fraga Juliano Cota

Júri:

Presidente:

Prof. Doutor Nuno Cruz

Vogais:

Prof. Doutor António Serrador

Prof. Nuno António Fraga Juliano Cota

Dezembro de 2019



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações e de Computadores



LTE-R

Comunicações Móveis Ferroviárias de Banda Larga

GRACIANO PEDREIRA TEIXEIRA

(Licenciado em Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações e de Computadores)

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações**

Orientador:

Prof. Nuno António Fraga Juliano Cota

Júri:

Presidente:

Prof. Doutor Nuno Cruz

Vogais:

Prof. Doutor António Serrador

Prof. Nuno António Fraga Juliano Cota

Dezembro de 2019

Agradecimentos

Gostaria de deixar os meus sinceros agradecimentos ao Professor Nuno António Fraga Juliano Cota, por todo o seu apoio, motivação, supervisão e recursos disponibilizados. Sem o seu apoio incondicional este projeto não teria sido possível.

Resumo

Assistimos atualmente em Portugal, mas também no resto do mundo, a projetos de renovação dos sistemas de telecomunicações móveis das ferrovias. A tecnologia que correntemente está a ser instalada em Portugal é o GSM-R, mas apesar de todas as inúmeras qualidades que esta tecnologia oferece, já se fala atualmente nas suas limitações. Assim, já há alguns anos que se procura pelo seu substituto e das opções que existem uma delas sobressai, o LTE-R.

Neste projeto, procura-se investigar o LTE-R e verificar a sua adequação às necessidades cada vez mais exigentes das ferrovias. O estudo do GSM-R e das comunicações móveis ferroviárias foi realizado. Neste verificou-se que a questão da segurança, da interoperabilidade e da sinalização ferroviária são fatores chave que qualquer tecnologia de comunicações móveis ferroviárias deve conseguir responder. A solução na europa para cumprir com esses objetivos é o ERTMS/ETCS, assim qualquer tecnologia de comunicações móveis ferroviárias tem obrigatoriamente de implementar as soluções definidas nestes dois sistemas.

Os requisitos específicos das telecomunicações ferroviárias são extensos. Eles incluem requisitos de cobertura de 95% em cada troço de 100m, níveis de sinal de -95 dBm, tempos de estabelecimento de chamada de emergência inferiores a dois segundos assim como uma extensa lista de requisitos funcionais que o LTE-R tem de conseguir garantir.

A ênfase do estudo encontra-se na interface rádio do LTE-R nesse sentido são efetuadas simulações do seu desempenho em condições de ambientes ferroviários, incluindo casos em que as velocidades praticadas atingem os 500km/h. Com dados de medidas rádio de um levantamento realizado numa linha férrea, são realizados estudos de cobertura e capacidade que permitem aferir a validade da utilização do LTE-R em ambientes ferroviários.

Palavras Chave

LTE-R, LTE, GSM-R, Comunicações Móveis Ferroviárias, ERTMS.

Abstract

We are currently witnessing in Portugal, but also in the rest of the world, projects for the renewal of railroad mobile telecommunications systems. The technology currently being installed in Portugal is GSM-R, but despite all the numerous qualities that this technology offers, it is currently being talked about its limitations. So, for some years now, we have been looking for a replacement, of which there is one of them that stands out, the LTE-R.

In this project, we seek to investigate the LTE-R, to verify its suitability to the increasingly demanding needs of the railways. The study of GSM-R and rail mobile communications was carried out. It was found that the issue of safety, interoperability and railway signalling are key factors that any rail mobile communications technology must be able to address. The solution in Europe to meet these objectives is ERTMS / ETCS, so any rail mobile communications technology must implement the solutions defined in these two systems.

Specific requirements for rail mobile telecommunications are extensive they include 95% coverage requirements on each 100m section, -95dBm signal levels, emergency call establishment times of less than two seconds as well as an extensive list of functional requirements that LTE-R must guarantee.

The emphasis of the study is on the LTE-R radio interface. Simulations of its performance are performed under conditions of railway environments, including cases where the speeds practiced reach 500km/h. With radio measurement data from a railway survey, coverage and capacity studies are performed to assess the validity of using LTE-R in railway environments.

Keywords

LTE-R, LTE, GSM-R, Railways Mobile Communications, ERTMS.

Índice Geral

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Palavras Chave	iii
Abstract	v
Keywords	v
Índice Geral	vii
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Lista de Acrónimos	xiii
Lista de Símbolos	xv
1. Introdução	1
1.1. <i>Enquadramento</i>	1
1.2. <i>Motivação</i>	3
1.3. <i>Objetivos</i>	4
1.4. <i>Estrutura do relatório</i>	4
2. Comunicações ferroviárias	7
2.1. <i>A tecnologia GSM-R</i>	7
2.1.1. <i>Desenvolvimento do GSM-R</i>	8
2.1.2. <i>Arquitetura da rede GSM-R</i>	9
2.2. <i>Requisitos específicos das ferrovias</i>	11
2.2.1. <i>Requisitos específicos das comunicações móveis ferroviárias</i>	11
2.2.2. <i>Requisitos de qualidade no GSM-R</i>	13
2.2.3. <i>Níveis mínimos de cobertura rádio</i>	14
2.2.4. <i>Velocidade máxima</i>	15
2.2.5. <i>Condições de instalação e ambientes</i>	15
2.3. <i>Espectro</i>	16

2.4.	<i>Arquitetura da rede celular</i>	17
2.5.	<i>Limitações do GSM-R</i>	18
3.	Tecnologia LTE	21
3.1.	<i>Introdução</i>	21
3.2.	<i>Arquitetura de rede</i>	21
3.3.	<i>Interface rádio</i>	23
3.3.1.	Partilha de recursos	24
3.3.2.	Multiple Input Multiple Output (MIMO).....	27
3.3.3.	Modulação e codificação.....	27
3.4.	<i>Ritmos de transmissão</i>	28
4.	LTE-R	31
4.1.	<i>Ritmo de transmissão</i>	31
4.2.	<i>Simulação de ritmos de transmissão em downlink</i>	35
4.3.	<i>Dimensionamento da ligação</i>	38
4.3.1.	Ligação ascendente	41
4.3.2.	Ligação descendente	46
4.4.	<i>Capacidade em função da distância</i>	51
5.	Caso de estudo	53
5.1.	<i>Caracterização da linha</i>	53
5.2.	<i>Cálculo da capacidade</i>	55
5.2.1.	Cálculo da relação SINR	55
5.2.2.	Determinação do ritmo de transmissão	56
5.3.	<i>Apresentação dos resultados</i>	57
5.3.1.	Potência recebida	57
5.3.2.	Best server.....	58
5.3.3.	Resultados do SINR	60
5.3.4.	Ritmo binário	63
5.3.5.	Otimização da sectorização.....	66
6.	Conclusões	71
6.1.	<i>Conclusões finais</i>	72
6.2.	<i>Trabalho futuro</i>	73

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Arquitetura de rede GSM-R (Retirado de [5]).	10
Figura 2.2 - Espectro atribuído à tecnologia GSM na faixa dos 900MHz.	16
Figura 2.3- Arquitetura de cobertura dupla com estações intercaladas (Retirado de [5]).	17
Figura 2.4 - Exemplo de separação de zonas de controlo (Retirado de [5]).	18
Figura 3.1 . Elementos da rede EPS (Retirado de [12]).	22
Figura 3.2 - Período de símbolo OFDM.	24
Figura 3.3 - Estrutura temporal do LTE (Retirado de [13]).	25
Figura 3.4 - Resource block, (Retirado de [14]).	26
Figura 4.1 - Variação do débito, em percentagem do valor de pico, em função do SNR. (Retirado de [16]).	32
Figura 4.2 – Variação do débito, em percentagem do valor de pico, em função do SNR para velocidades até 500km/h..	33
Figura 4.3 – Atenuação em função da distância entre o emissor e o recetor para $f=450\text{MHz}$ e $f=900\text{MHz}$.	36
Figura 4.4 – Ritmo binário em função do raio para $f=450\text{MHz}$ e $f=900\text{MHz}$ com $LB = 1.4\text{MHz}$.	37
Figura 4.5 - Ritmo binário em função do raio para $f=450\text{MHz}$ e $f=900\text{MHz}$ com $LB = 3\text{MHz}$.	38
Figura 4.6 – Fluxograma do processo de dimensionamento (Retirado de [17]).	40
Figura 4.7 – Ritmo Binário em função da distância para a ligação descendente.	52
Figura 5.1 - Mapa da Linha da Beira Baixa.	54
Figura 5.2 - Esquema de reutilização de frequências (Retirado de [18]).	56
Figura 5.3 - Potência recebida ao longo da linha.	58
Figura 5.4 – Histograma do best server.	59
Figura 5.5 - Potência recebida do Best Server.	60
Figura 5.6 – SINR.	60
Figura 5.7 - Gráfico da potência do Best Server e do SINR.	61
Figura 5.8 - Gráfico da potência recebida de todas as antenas e curva do SINR.	62
Figura 5.9 – Ritmo binário por RB para $v=3\text{km/h}$ e $v=120\text{km/h}$.	63

Figura 5.10– Ritmo binário por RB para $v=250\text{km/h}$ e $v=500\text{km/h}$	64
Figura 5.11 - Ritmo binário total em função da distância, no trecho Pk187+834 – Maçainhas.	65
Figura 5.12 – Treço entre Pk 187+834 e Maçainhas.....	65
Figura 5.13 - Treços de Caria - Belmonte e Belmonte - PN187+984.....	66
Figura 5.14 - Potência recebida sem o eNodeB de Belmonte	67
Figura 5.15 - SINR sem o eNodeB de Belmonte.	68
Figura 5.16 - Ritmo binário por RB sem o eNodeB de Belmonte.	69

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Requisitos de Qualidade GSM-R (Retirado de [5]).	13
Tabela 2.2 - Níveis de potência mínima recebida em GSM-R (Retirado de [5]).	14
Tabela 3.1 - Número de RB e subportadoras em função da largura de banda.	26
Tabela 3.2 - Ritmos de transmissão do LTE em uplink. (Retirado de [15]).	29
Tabela 3.3 - Ritmos de transmissão do LTE em downlink. (Retirado de [14]).	30
Tabela 4.1 - Requisitos de SINR (Retirado de [12]).	33
Tabela 4.2 - Linkbudget da ligação ascendente.....	45
Tabela 4.3 - Linkbudget da ligação descendente.....	48
Tabela 4.4 - Cálculo da capacidade na ligação descendente.	50

Lista de Acrónimos

ATP	<i>Automatic Train Protection</i>
AuC	<i>Authentication Center</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BSC	<i>Base Station Controller</i>
BSS	<i>StationSub-system</i>
BTS	<i>Base Transceiver Station</i>
CEPT	<i>European Conference of Postal and Telecommunications Administration</i>
CN	<i>Core Network</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
E-GSM	<i>Extended GSM</i>
EIR	<i>Equipment Identity Register</i>
EIRENE	<i>European Integrated Radio Enhanced Network</i>
eNodeB	<i>Evolved NodeB</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
EPS	<i>Evolved Packet System</i>
ERTMS	<i>European Rail Traffic Management System</i>
E-SMLC	<i>Evolved Serving Mobile Location Centre</i>
ETCS	<i>European Train Control System</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
E-UTRAN	<i>Evolved - Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
FRCMS	<i>Future Railway Mobile Communication System</i>
FSR	<i>Functional Requirements Specification</i>
GMLC	<i>Gateway Mobile Location Centre</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GSM-R	<i>Global System for Mobile Communications Railways</i>
HLR	<i>Home Location Register</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
IM	<i>Implementation Margin - (Margem de Implementação)</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
kbps	<i>Kilo Bits Per Second</i>
LB	<i>Largura de Banda</i>
LDA	<i>Location Dependent Addressing</i>
LSTI	<i>LTE/SAE Trial Initiative</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-R	<i>Long Term Evolution - Railways</i>
Mbps	<i>Mega Bits Per Second</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MORANE	<i>MOBILE radio for RAILway Networks in Europe</i>
MS	<i>Mobile Station</i>
MSC	<i>Mobile Services Switching Centre</i>
NSS	<i>Network Sub-System</i>

OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
OMC	<i>Operation and Maintenance Centre</i>
PCRF	<i>Policy Control and Charging Rules Function</i>
PDN	<i>Packet Data Network</i>
P-GW	<i>PDN Gateway</i>
Pk	<i>Ponto quilométrico</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RB	<i>Resource Block</i>
RE	<i>Resource Element</i>
REG	<i>Resource Element Group</i>
RRU	<i>Remote Radio Unit</i>
SAE	<i>System Architecture Evolution</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Antenna</i>
S-GW	<i>Serving Gateway</i>
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i>
SINR	<i>Signal To Interference Plus Noise Ratio</i>
SISO	<i>Single Input Single Output</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SRS	<i>System Requirements Specification</i>
TETRA	<i>Terrestrial Trunked Radio</i>
TRX	<i>Transceivers</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UIC	<i>Union Internationale des Chemins de Fer</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
UTRAN	<i>Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
VLR	<i>Visitor Location Register</i>

Lista de Símbolos

$a(h_m)$	Termo corretivo para a altura do equipamento móvel
$B_{DL_noiseRise}$	Valor médio de interferência.
B_{IUL}	Margem de interferência na ligação ascendente
B_{LNF}	Margem de desvanecimento Log-Normal
d	Distância
d_i	Distância no ponto i
d_{max}	Distância máxima da ligação
dB	Decibel
dBm	Decibel mili-watt
f	Frequência
F	Parâmetro empírico que relaciona os sinais da antena emissora e das suas interferentes
F_c	Parâmetro que relaciona os sinais da antena emissora e das suas interferentes próximo da fronteira de célula
F_i	Parâmetro F para o ponto i
G_a	Ganho de antena
H	Fator de atenuação médio
h	Hora
h_{be}	Altura do eNodeB
h_m	Altura do equipamento móvel
Hz	Hertz
K_{mr}	Fator corretivo para áreas suburbanas
km	Quilómetro
L	Atenuação
$L_{sa_cellRange}$	Atenuação do sinal na fronteira da célula
L_{sa_i}	Atenuação no ponto i
L_p	Atenuação do Percurso
L_{pmax}	Atenuação máxima de percurso
L_{Total}	Atenuação total
m	Metro
MHz	Mega Hertz
n	Coefficiente de decaimento
N_{f_UE}	Figura de ruído do recetor de eNodeB
N_{RB_DL}	Ruído térmico por <i>resource block</i> na ligação descendente
N_{RB_UL}	Ruído térmico por <i>resource block</i> na ligação ascendente
N_f	Figura de ruído
N_t	Densidade espectral de potência de ruído térmico
P_i	Potência no ponto i
P_j	Potência no ponto j
P_{tx_RB}	Potência transmitida por <i>resource bloc</i>
P_{UE_RB}	Potência emitida por RB no UE
P_{rx}	Potência recebida

P_{tx}	Potência emitida
P_{noise}	Potência do Ruído
Q_{DL}	Volume de carga do sistema no <i>downlink</i>
Q_o	Fator corretivo para áreas abertas
Q_r	Fator corretivo para áreas quase abertas
Q_{UL}	Volume de carga do sistema no <i>uplink</i>
R_{avg_DL}	Ritmo binário médio no <i>downlink</i>
R_{RB}	Ritmo Binário Por <i>Resource Block</i>
s	Segundo
S_{eNodeB}	Sensibilidade no eNodeB
S_{UE}	Sensibilidade no EU
v	Velocidade
W	Watt
W_{RB}	Largura de banda por <i>resource block</i>
x	Abissa do valor de probabilidade de cobertura da função cumulativa de probabilidade Log-Normal
γ	SINR
γ_{DL_ave}	Valor Médio de SINR
$\gamma_{cellRange}$	SINR na fronteira da célula
γ_i	SINR no ponto i
σ_{LNF}	Desvio padrão característico do ambiente de propagação

1. Introdução

Neste capítulo procede-se a uma introdução ao tópico que se pretende estudar, apresentam-se as motivações, os objetivos e apresenta-se uma descrição da estrutura do documento.

1.1. Enquadramento

Os transportes públicos são fundamentais na sociedade em que vivemos, onde cada vez mais é necessário abandonar os transportes individuais e recorrer a transportes coletivos, económicos, seguros, eficazes e também mais ecológicos. Desde o início da revolução industrial que os caminhos de ferro são o melhor exemplo disso mesmo. A evolução que ocorreu nos caminhos de ferro ao longo das últimas décadas é extraordinária. Trata-se de uma área que está em constante evolução em todas as suas vertentes. Uma das vertentes indispensáveis aos caminhos de ferro são as telecomunicações e desde há muito que elas fazem parte da estrutura dos mesmos.

Nos dias de hoje o *Global System for Mobile Communications – Railways* (GSM-R) é a tecnologia mais recente usada nas comunicações móveis ferroviárias. Trata-se de uma tecnologia que tem como base o *Global System for Mobile Communications* (GSM) que foi adaptada para responder as exigências das comunicações móveis ferroviárias. O GSM-R foi uma solução encontrada para modernizar e uniformizar os sistemas de comunicação utilizados nas ferrovias europeias. Tratou-se de uma grande evolução considerando que, até este ponto, se utilizavam inúmeros sistemas analógicos antiquados e sem qualquer uniformidade ao longo das ferrovias europeias. Com o GSM-R surgiu também o *European Rail Traffic Management System* (ERTMS) que é o standard europeu que pretende garantir a segurança, a otimização e a interoperabilidade dos sistemas ferroviários na europa.

O ERTMS é constituído por duas componentes principais, o GSM-R e o *European Train Control System* (ETCS). O ETCS é um sistema automático de proteção de comboios (*Automatic Train Protection* - ATP) cujo objetivo é permitir a interoperabilidade nas ferrovias europeias. Antes do surgimento deste sistema existiam inúmeros sistemas de

sinalização ferroviária nos diferentes países da união europeia. Isto levava a que fosse impossível para um comboio circular em linhas férreas que dependiam de sistemas de sinalização diferentes daqueles que estavam instalados no comboio. O que provocava graves embaraços na circulação ferroviária internacional na europa. Assim, com a uniformização de um sistema de sinalização como o ETCS, torna-se bem mais simples esta circulação ao longo dos caminhos de ferro da europa. Este sistema providencia a sinalização nas vias ferroviárias e pode ter quatro níveis diferentes, que são:

- **ETCS Nível 0** – Ocorre quando um comboio equipado com um sistema ERTMS/ETCS circula numa ferrovia que não está equipada com o mesmo sistema. A sinalização a considerar é a presente na via, no entanto o sistema ETCS continua a verificar os parâmetros do comboio, nomeadamente a velocidade.
- **ETCS Nível 1** – Neste caso tanto o comboio como a linha estão equipados com o sistema ERTMS/ETCS e os mesmos comunicam entre si. Neste nível a necessidade da sinalização da linha ferroviária depende do grau de integração do sistema na linha.
- **ETCS Nível 2** – Neste nível a sinalização na via já não é necessária, mas a via ainda tem de estar equipada com os equipamentos ETCS, toda a sinalização é garantida pelo sistema ETCS. Aqui a comunicação entre o comboio e a infraestrutura já é garantida pelo sistema de comunicações móvel.
- **ETCS Nível 3** – O nível 3 é idêntico ao 2, mas neste caso a via já não necessita de estar equipada com os equipamentos ETCS. Toda a sinalização é garantida pelo sistema ETCS e a comunicação tem de ser garantida pelo sistema de comunicação móvel.

Verifica-se então que nos níveis dois e três de ETCS o sistema depende da infraestrutura de comunicações móveis, que atualmente é o GSM-R. No futuro, qualquer sistema que venha a substituir o GSM-R terá também ele de suportar o ETCS.

Tendo começado pelo telégrafo, a evolução até a tecnologia atualmente utilizada, o GSM-R, não é inferior aquela que se passou nos comboios em si. Mas, e por mais evoluída que

seja a tecnologia atualmente utilizada, não é suficiente. Já no presente se começam a observar sérias limitações no sistema GSM-R. Como tal, é necessário olhar em frente e procurar soluções. Essas soluções passarão indubitavelmente por novas tecnologias de telecomunicações que possam vir a suprir as insuficiências da tecnologia atual, e a responder às necessidades, cada vez mais exigentes, das infraestruturas de caminhos de ferro.

Uma das potenciais alternativas encontra-se no *Long Term Evolution – Railways* (LTE-R), uma tecnologia que tem por base o *Long Term Evolution* (LTE). Inúmeros especialistas na área concordam que o LTE tem tudo para ser uma boa base tecnológica para vir a suprir as necessidades de telecomunicações da ferrovia.

1.2. Motivação

Sendo o LTE-R uma tecnologia muito consensual entre os especialistas para a eventual substituição do GSM-R, ou pelo menos um caminho para o sistema *Future Railway Mobile Communication System* (FRCMS), muitas dúvidas ainda prevalecem e muita investigação ainda terá de ser feita antes de se poder considerar o LTE-R como o substituto do GSM-R. É, aliás, inevitável que se essa decisão chegar mesmo a ser tomada, tenha de existir um período, ainda considerável, em que as duas tecnologias tenham de coexistir.

Sem dúvida que o LTE introduziu substanciais melhorias nas comunicações móveis. Agora pretende-se descobrir se o LTE-R é a tecnologia indicada para melhorar as comunicações ferroviárias.

Assim, é importante responder a um conjunto de questões que se colocam, sobre a adoção do LTE-R para substituição do GSM-R:

1. Qual a compatibilidade entre os dois sistemas?
2. Podemos adequar o LTE-R de forma a tornar mais transparente, simples e económica a transição entre as duas tecnologias?
3. Que qualidade de serviço poderemos oferecer?

4. As questões de cobertura rádio, são ultrapassáveis com esta tecnologia?

A implementação de um sistema de LTE-R na Coreia do Sul, ainda que numa linha onde não se praticam as velocidades para os quais o GSM-R está normalizado, vem deixar claras indicações de que o LTE-R tem o que é necessário para satisfazer as necessidades de telecomunicações móveis dos caminhos de ferro. Vários estudos já foram realizados a diversas componentes desta tecnologia e a generalidade deles dá indicações positivas quanto às capacidades da mesma [1] [2] [3] [4].

Assim, este trabalho pretende contribuir para a resposta a algumas das questões levantadas anteriormente.

1.3. Objetivos

Neste trabalho pretende-se investigar a tecnologia LTE-R, tecnologia esta que possui muitas características interessantes e que podem vir a ser a solução para as telecomunicações ferroviárias. Este tipo de telecomunicações implicam a obrigatoriedade de suprir diversas necessidades, que na sua globalidade são bastante exigentes. O trabalho aqui apresentado irá focar-se na componente rádio do sistema LTE-R, nomeadamente nas questões de cobertura e capacidade, fundamentais neste tipo de telecomunicações. No decorrer do processo as comparações com o GSM-R serão constantes, dado que atualmente essa é a tecnologia de referência na área das telecomunicações nas ferrovias.

1.4. Estrutura do relatório

Este relatório encontra-se distribuído por seis capítulos, sendo o primeiro capítulo a introdução. No capítulo número dois procede-se à apresentação das comunicações ferroviárias e da tecnologia GSM-R, com as suas características, as suas qualidades e as suas limitações. No capítulo três apresenta-se o LTE, isto é fundamental pois trata-se da tecnologia que serve de base ao nosso estudo.

No capítulo quarto, apresenta-se o LTE-R, a versão ferroviária do LTE, este ponto é o ponto fulcral deste trabalho e é nele que se expõem os temas incontornáveis deste

trabalho. No quinto capítulo apresenta-se um caso de estudo e, finalmente, apresentam-se as conclusões e trabalho futuro no sexto e último capítulo.

2. Comunicações ferroviárias

No presente a tecnologia de telecomunicações móveis ferroviárias mais usada será o GSM-R. E qualquer tecnologia que venha a substituir o GSM-R terá, indubitavelmente, de conseguir realizar as mesmas tarefas que a corrente tecnologia já faz e, ir mais além, conseguindo suprir novas necessidades de telecomunicações nas ferrovias que gradualmente vão surgindo e na modernização das existentes. Faz sentido, inclusivamente, considerar-se que numa fase inicial da eventual integração do LTE-R ao serviço das ferrovias, os recursos tenham de ser partilhados entre as duas tecnologias.

Assim é importante apresentar-se a tecnologia atualmente em uso, o GSM-R, como fator chave para compreensão da evolução futura e dos requisitos deste tipo de sistema. Neste capítulo são apresentadas as características mais importantes que um sistema de comunicações móveis ferroviárias deverá conter.

2.1. A tecnologia GSM-R

A tecnologia GSM-R é uma adaptação do sistema GSM às comunicações móveis nos caminhos-de-ferro. Consiste numa norma de telecomunicações que pretende suprir as necessidades de comunicações móveis dos caminhos-de-ferro. A norma GSM-R teve na sua origem a norma GSM Fase 2+ à qual foram introduzidas as alterações necessárias para a adaptar às características intrínsecas e aos requisitos próprios das ferrovias [5].

Com o GSM-R pretendeu-se uniformizar os sistemas de comunicações utilizados nos diferentes caminhos-de-ferro que se estendem por toda a Europa. Considerando que esta norma se tornou de uso obrigatório em todas as linhas de caminho de ferro da Europa [6]. Tornou-se inevitável, que de forma progressiva, as múltiplas linhas de caminhos de ferro migrassem dos seus antiquados sistemas analógicos de telecomunicações móveis para o GSM-R. Isto leva a que cada vez mais na Europa se obtenha uma uniformização das telecomunicações sem fio usadas nas linhas férreas.

2.1.1. Desenvolvimento do GSM-R

No início dos anos 90, a *Union Internationale des Chemins de Fer* (UIC) com o objetivo de modernizar e uniformizar os sistemas de comunicações dos caminhos de ferro na Europa, iniciou um projeto para a implementação de um sistema de comunicações digitais sem fios. Numa fase inicial foi realizado um estudo de viabilidade de dois sistemas de comunicações, o GSM e o *Terrestrial Trunked Radio* (TETRA). Após o estudo e comparação das duas tecnologias, a escolha da UIC recaiu sobre o GSM por variados motivos, mas principalmente pelo facto de ser o único dos dois a já se encontrar em uso comercial [7], e de se tratar de uma tecnologia amplamente utilizada, com grande fiabilidade e robustez na interface rádio, tratando-se efetivamente do maior sucesso no que diz respeito a normas de comunicações sem-fios [5].

Na sequência da escolha efetuada, a UIC encetou uma negociação com a *European Conference of Postal and Telecommunications Administration* (CEPT) com o objetivo de obter a largura de banda necessária para suprimir as necessidades de comunicações móveis dos caminhos de ferro. Este pedido levou à decisão de atribuir uma largura de banda de 4MHz para uso exclusivo dos caminhos de ferro. Estes 4MHz situam-se logo abaixo do *Extended GSM* (E-GSM).

Logo à partida ficou claro que a norma GSM necessitaria de ser adaptada para conseguir satisfazer todos os requisitos necessários ao seu uso no sector ferroviário. Assim, em 1992 a UIC lançou um projeto chamado *European Integrated Radio Enhanced Network* (EIRENE) com o objetivo de definir e normalizar uma rede móvel capaz de suprir as necessidades dos caminhos de ferro e de assegurar a interoperabilidade das linhas entre os diferentes países. Neste projeto procede-se a uma descrição dos elementos obrigatórios à operação e interoperabilidade das linhas, tendo como objetivo o serviço ininterrupto das linhas de ferro mesmo na sua operação entre diferentes países da Europa.

A primeira versão das especificações EIRENE foi concluída em 1995. Para a integração das especificações EIRENE na norma GSM foi necessária a colaboração do *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI). Tendo em vista a validação das especificações EIRENE e conversão em implementações técnicas, em 1995 foi formado um consórcio entre diferentes entidades relevantes da área. Este consórcio, composto por operadores de ferrovias, laboratórios e fornecedores de equipamentos GSM, conseguiu

com sucesso avançar com o projeto *MOBILE radio for RAILway Networks in Europe* (MORANE). Neste projeto foram desenvolvidos protótipos e criadas três redes, procedendo-se a inúmeros testes e ensaios. O projeto MORANE permitiu validar com sucesso todas as funções obrigatórias do sistema.

Os projetos EIRENE e MORANE foram concluídos no ano 2000 e destes saíram as normas *Functional Requirements Specification* (FSR) versão 4 e *System Requirements Specification* (SRS) versão 12. Assim nasceu o GSM-R. O projeto *European Rail Traffic Management System* (ERTMS)/GSM-R veio prosseguir o trabalho dos projetos EIRENE e MORANE onde foram combinados os dados e experiências dos diferentes locais de ensaios, sendo um dos objetivos primordiais a partilha de informação e experiências.

Apesar de o GSM-R ser muito idêntico ao GSM existem algumas diferenças muito relevantes. Entre estas, as mais importantes são a capacidade de o GSM-R poder ser usado em velocidades de até 500km/h, permitir *handovers*, seleção e reselectão de células mais rápidos e muitas outras adaptações foram efetuadas para tornar o GSM-R o mais adequado possível às necessidades exigidas pelas ferrovias.

2.1.2. Arquitetura da rede GSM-R

A arquitetura do GSM-R é idêntica àquela do GSM, no entanto alguns dos equipamentos usados necessitam obrigatoriamente de possuir características mais exigentes e restritas do que aqueles usados no GSM público. Nomeadamente as estações base e os equipamentos terminais, também as antenas necessitam de ser mais diretivas do que aquelas do serviço público, dado que essencialmente se pretende proceder à cobertura ao longo de uma linha e não ao longo de uma área.

A Figura 2.1 exemplifica a constituição de uma rede GSM-R. A parte móvel da rede é composta pelo equipamento terminal designado por *Mobile Station* (MS) e que inclui *Subscriber Identity Module* (SIM) onde constam as informações do utilizador que permitem a sua ligação e autenticação na rede.

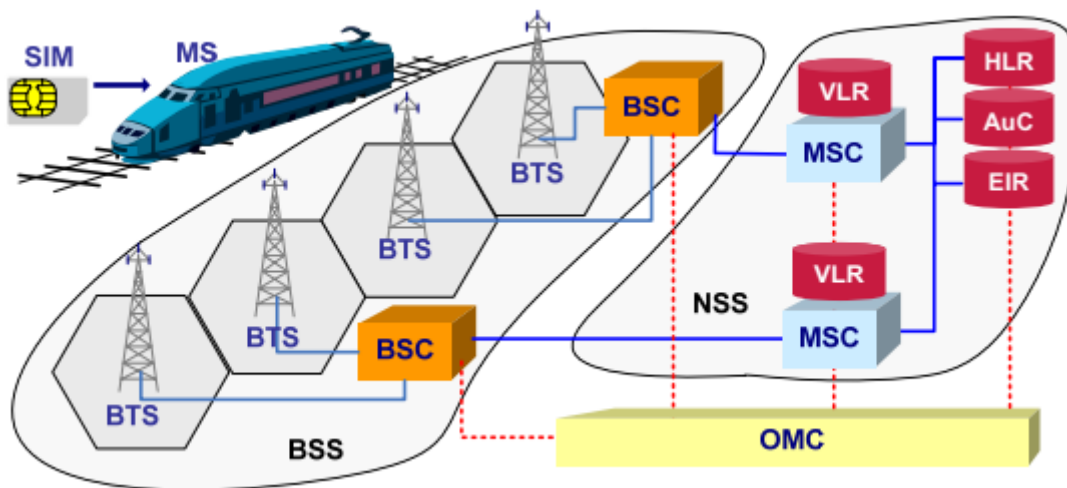


Figura 2.1 - Arquitetura de rede GSM-R (Retirado de [5]).

A rede encontra-se dividida em dois grandes sub-sistemas, o *Base Station Sub-system* (BSS) e o *Network Sub-System* (NSS). O BSS é responsável pela gestão de todo o sistema rádio e é constituído pelos *Base Station Controllers* (BSC), que são responsáveis pelo controlo das *Base Transceiver Stations* (BTS), o segundo elemento do BSS e onde se localizam os *transceivers* (TRX). O NSS é constituído pelos *Mobile Services Switching Centre* (MSC) que são responsáveis pela gestão de todas as chamadas, e têm associados *Visitor Location Registers* (VLR) onde está presente toda a informação dos assinantes que se encontram na área do MSC correspondente. Fazem também parte do NSS três bases de dados que são o *Home Location Register* (HLR), responsável pela gestão do perfil dos utilizadores, o *Authentication Center* (AuC), dedicado a gestão dos mecanismos de segurança e o *Equipment Identity Register* (EIR) que é responsável pelos dados respeitantes aos equipamentos móveis.

No seu *core* a rede possui o *Operation and Maintenance Centre* (OMC). Sobre este recai a responsabilidade de proceder à configuração, gestão e monitorização de toda a rede [5].

2.2. Requisitos específicos das ferrovias

O planeamento celular necessário ao GSM-R é, em muitos aspetos, idêntico àquele realizado no planeamento do GSM público. As metodologias de planeamento e otimização utilizadas no GSM são bem conhecidas e estão bem estruturadas, tendo em conta os objetivos fundamentais da tecnologia. No entanto, estes objetivos e características diferem, em alguns elementos, daqueles que são essenciais para satisfazer as necessidades muito particulares das ferrovias. Assim, no planeamento de uma rede GSM-R, ou de outra rede de telecomunicações móveis ferroviárias, existem algumas particularidades que é essencial que sejam devidamente consideradas. Nos próximos pontos são abordados alguns dos elementos mais relevantes no desenvolvimento e planeamento de uma rede de comunicações móveis ferroviárias.

2.2.1. Requisitos específicos das comunicações móveis ferroviárias

Qualquer sistema de comunicações móveis usado em ferrovias deve ser capaz de garantir que as seguintes características e condições se verifiquem:

- As velocidades praticadas nas ferrovias podem ser consideravelmente superiores às dos veículos rodoviários. Assim, as tecnologias que suportem os serviços de telecomunicações móveis ferroviárias têm de estar preparadas para servir equipamentos móveis que se desloquem até à velocidade de 500km/h, garantindo os parâmetros de qualidade mínimos exigidos. Nesta questão três dos mais importantes obstáculos são o efeito de *Doppler*, o *delay spread* e o tempo de coerência.
- As linhas ferroviárias encontram-se divididas por zonas. Para cada zona existe um controlador distinto. O sistema tem de estar preparado para que um determinado controlador consiga contactar simultaneamente todos os comboios que se encontrem na sua área de responsabilidade. Para que este requisito seja garantido é necessário que exista uma delimitação correta e fiável das diferentes zonas.

- O sistema de comunicação móvel ferroviário tem de estar preparado para suportar os diversos equipamentos terminais que podem ser usados nas ferrovias, suportando as características intrínsecas de cada um dos equipamentos.
- O ETCS tem de ser suportado. Este sistema complementa ou substitui (dependendo do seu nível) a sinalização das vias ferroviárias e indica as condições da linha. Como tal requer um alto nível de confiabilidade do sistema de telecomunicações que o suporta. Em determinadas circunstâncias uma falha na ligação rádio levará a que o comboio sofra uma paragem de emergência por questões de segurança.
- Todos os requisitos funcionais descritos em [8] devem ser suportados de acordo com o definido no documento.

Os requisitos funcionais referidos no ponto anterior encontram-se separados por vários grupos distintos, entre estes incluem-se:

- Serviços de voz, como chamadas ponto a ponto, chamadas de emergência, chamadas de *broadcast* e chamadas de grupo.
- Serviços de dados que se traduzem em mensagens de texto, e outros serviços de transporte de dados para aplicações em geral, fax e aplicações de controlo do comboio.
- Serviços relacionados com chamadas, tais como prioridade multinível e preempção, chamada em espera, transferência de chamadas, barragem de chamadas e outros.
- Aplicações específicas às ferrovias como o suporte do endereçamento funcional por comboio, locomotiva ou outro. Chamadas de emergência, comunicação entre diferentes maquinistas na mesma composição e outros.
- Características específicas às ferrovias, como realização de chamadas premindo apenas uma tecla, ou mecanismo similar. Mostrar o número marcado e o número das chamadas recebidas, estabelecimento rápido de

chamadas, controlo sobre a seleção de rede móvel e controlo da configuração do sistema.

Para que as condições anteriores se verifiquem, no planeamento do sistema usado deve-se assegurar boas condições de cobertura, garantir os níveis mínimos requeridos e a gestão dos *handover* deve ser planeada com extremo cuidado. Em todos estes pontos os níveis de exigência são consideravelmente superiores no caso dos sistemas de comunicação móvel ferroviária em comparação com os sistemas de comunicação móvel públicos [6].

2.2.2. Requisitos de qualidade no GSM-R

Um dos pontos onde existem diferenças significativas entre o GSM e o GSM-R é na qualidade mínima de serviço. Os requisitos de qualidade são muito mais exigentes no GSM-R comparativamente com o GSM. As especificações do GSM-R estabelecem que os requisitos de qualidade do sinal recebido tenham no mínimo os valores registados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Requisitos de Qualidade GSM-R (Retirado de [5]).

Requisito de Qualidade GSM-R		Valor
Probabilidade de cobertura		95%
Tempos de estabelecimento de ligações	< 5 s	95% das chamadas
	< 7,5 s	100% das chamadas
Tempos de estabelecimento de ligações em chamadas de emergência		<2s
Atraso máximo de uma ligação		0,7s
Disponibilidade do sistema		>99.95%.
Taxa de queda de chamadas		≤1%
Congestionamento na interface rádio		≤1%
Taxa de sucesso dos <i>Handovers</i>		≥99%
Bloqueio do canal de tráfego		≤1%

A probabilidade de cobertura deve ser no mínimo de 95%, medida a cada intervalo de 100m. Os tempos máximos para estabelecimento de chamadas deverá ser inferior a 7,5 segundos em todas as chamadas e inferior a 5 segundos em pelo menos 95% das chamadas. Para as chamadas de emergência este período é ainda inferior, não podendo ultrapassar os dois segundos. O sistema terá de garantir uma disponibilidade de 99,95%, no mínimo, e uma taxa de sucesso de *handovers* de pelo menos 99%.

2.2.3. Níveis mínimos de cobertura rádio

Os níveis mínimos requeridos em GSM-R são também eles mais exigentes que aqueles da rede pública equiparada. As especificações EIRENE referem que a probabilidade de cobertura deve ser, em qualquer circunstância, de pelo menos 95% em cada troço de 100 metros de linha. Aquando do planeamento da rede é necessário considerar esta exigência, dado que ela pode alterar substancialmente os resultados do planeamento. Pois, e ao contrário de uma rede GSM pública, onde a probabilidade de cobertura é determinada considerando toda a área coberta. No caso do GSM-R são considerados troços de 100m ao longo da linha e não toda a área de cobertura [6].

Tabela 2.2 - Níveis de potência mínima recebida em GSM-R (Retirado de [5]).

Aplicação		Nível mínimo
Voz ou dados sem requisitos especiais		-98dBm
Linhas com ETCS de níveis 2/3 para velocidades inferiores a 220 km/h		-95dBm
Linhas com ETCS de níveis 2/3 para velocidades superiores a 220 km/h os valores constituem apenas uma recomendação	Velocidade entre 220 e 280km/h	-95dBm
	Velocidade superior a 280km/h	-92dBm

Relativamente aos níveis, os mínimos constantes na Tabela 2.2 são também eles exigidos.

Os níveis indicados na Tabela 2.2 são referentes ao sinal recebido numa antena isotrópica colocada sobre o topo do comboio a uma altura de 4m relativamente à linha. Estes valores são apenas válidos para o recetor da cabine do comboio. No caso dos terminais portáteis usados no GSM-R os valores dos sinais recebidos são idênticos àqueles do GSM. Também a probabilidade de cobertura nestes mesmos terminais é igual à do GSM não sendo necessário cumprir com os requisitos mais restritivos do GSM-R.

2.2.4. Velocidade máxima

O GSM foi desenhado para conseguir suportar terminais que se desloquem no máximo a 250km/h. Para a generalidades dos casos onde o GSM é utilizado, esta velocidade é perfeitamente suficiente. No entanto, no caso dos comboios, as velocidades praticadas podem ser consideravelmente superiores. Assim, o GSM-R foi desenhado para garantir a comunicação com terminais que se desloquem a velocidades até 500km/h. Esta exigência tem muito impacto no planeamento tanto no caso do GSM-R como no caso do LTE-R. As velocidades elevadas são particularmente preocupantes no caso do LTE-R, cujo princípio de funcionamento se baseia na ortogonalidade das suas portadoras, e a velocidade pode ser um fator que leve a que essa ortogonalidade seja perdida. O que pode colocar em causa o bom desempenho do sistema.

2.2.5. Condições de instalação e ambientes

A propagação em ambientes ferroviários é distinta daquela em ambientes mais convencionais. Nos ambientes ferroviários, e tendo apenas em conta o rádio da cabine, habitualmente, a ligação menos favorável é o *downlink* [6]. A cobertura pretendida nas ferrovias é a necessária a cobrir a extensão e largura das linhas. Tais ambientes possuem características mais favoráveis à propagação rádio do que no caso dos ambientes onde habitualmente se utiliza o GSM público. Logo, no planeamento do GSM-R os parâmetros estatísticos usados devem ser mais favoráveis do que aqueles usados no GSM. Este facto foi já comprovado em campanhas de medidas efetuadas em ambientes ferroviários. As medidas obtidas nestas campanhas mostram que os parâmetros são consideravelmente mais favoráveis neste caso.

A instalação de antenas no GSM-R também tem algumas particularidades, pois ao contrário do GSM, aqui pretende-se dar apenas uma cobertura à extensão da linha férrea. Assim, habitualmente, são instalados sites bi-sectorizados com antenas mais diretivas. Estes sites encontram-se localizados por norma dentro dos limites das ferrovias. Isto providencia, para além de uma contenção de custos, uma maior segurança para o sistema, dado que o acesso a estes locais é por norma muito restrito. A localização dos sites ao longo da linha deve também ter em conta um dos requisitos fundamentais nas comunicações móveis ferroviárias que é a divisão das mesmas em troços, que devem ser bem delimitados. Uma das formas de proceder a esta delimitação de forma eficiente e eficaz é fazer coincidir a localização das estações base com a fronteira entre zonas de controlo. Desta forma consegue-se garantir que a localização do comboio dentro de uma determinada zona é efetuada de forma correta.

2.3. Espectro

O espectro reservado pelo *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) ao GSM-R é constituído por uma banda de 4MHz para *uplink* (876 a 880MHz) e uma banda de 4MHz para *downlink* (921 a 925MHz). A banda GSM-R localiza-se logo abaixo do E-GSM, tal como se pode observar na Figura 2.2. Na mesma figura também constam as bandas de frequência para o GSM público.

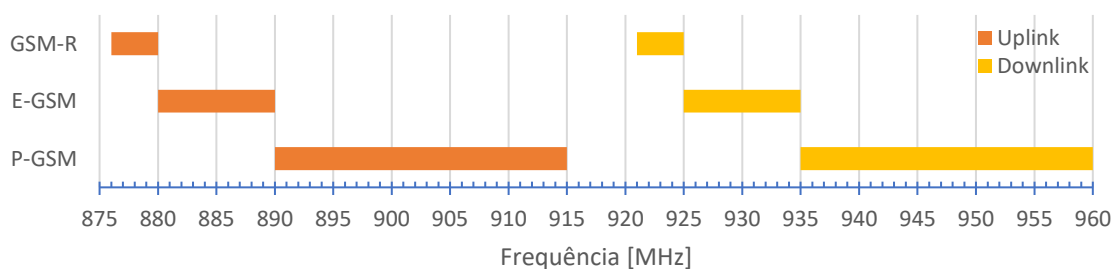


Figura 2.2 - Espectro atribuído à tecnologia GSM na faixa dos 900MHz.

No total a banda GSM-R é constituída por 19 canais de 200kHz para *downlink* e 19 canais de características semelhantes para *uplink*. Foram também reservadas duas bandas de guarda. No extremo inferior essa banda de guarda é constituída por 100kHz. Para a banda de guarda entre o GSM-R e o E-GSM, no extremo superior da banda do GSM-R, foram considerados 200kHz [5].

No caso do LTE-R existem algumas bandas que estão a ser consideradas para o seu funcionamento. No caso da Europa o espectro a atribuir poderá estar nos 400 MHz, na gama dos 790 a 960 MHz, nos 1.7 a 2.2 GHz ou mesmo na gama dos 2.5 a 2.7 GHz. É espectável que venham a ser atribuídas mais de uma gama de frequências ao longo do espectro.

2.4. Arquitetura da rede celular

Considerando o nível de exigência na disponibilidade deste tipo de redes, compreende-se a necessidade de se recorrer a sistemas fiáveis e com a redundância necessária a garantir os níveis de disponibilidade exigidos pela norma. Assim de todas as arquiteturas disponíveis, aquela que se considera ser a preferível é uma rede com cobertura dupla e com estações rádio intercaladas, ou seja, estações rádio independentes umas das outras em cada ponto de cobertura. Um exemplo desta solução de arquitetura pode ser observado na Figura 2.3, nela observam-se duas redes completamente distintas a cobrir a mesma linha. Este tipo de arquitetura tem o inconveniente de aumentar consideravelmente os custos com a rede, dado que na prática existem dois sistemas distintos a serem planeados, implementados e mantidos.

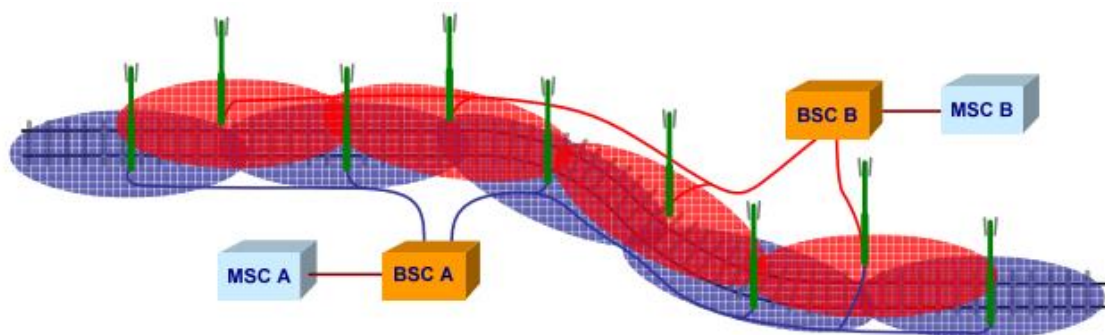


Figura 2.3- Arquitetura de cobertura dupla com estações intercaladas (Retirado de [5]).

Para efeitos de controlo, as ferrovias apoiam-se num princípio de divisão de linhas em troços de dimensão inferior. Cada um destes troços [6] é da responsabilidade de um controlador distinto. É fundamental que o controlador conheça e consiga contactar cada comboio que se encontra dentro da sua zona de controlo. Por outro lado, o maquinista de cada comboio, deve ser capaz de contactar de forma imediata o controlador responsável pela zona onde o comboio se encontra. A característica fundamental no GSM-R que

permite que esta função possa ser efetuada é o *Location Dependent Addressing* (LDA). Esta funcionalidade da rede permite ao maquinista contactar o controlador responsável pela zona onde a composição se encontra apenas com um simples toque num botão. A partir desse ponto a rede é responsável por encaminhar a ligação automaticamente para o controlador correto, sem qualquer ação adicional do maquinista. É exatamente por este motivo que os limites de cobertura de cada estação base, especialmente se for uma estação base no limite de zona, devem ficar bem definidos. Na Figura 2.4 observa-se uma das soluções que ajuda a proceder a esta divisão de zona. Consiste em colocar as antenas na zona de divisão ajudando desta forma a efetivamente localizar o comboio e associá-lo ao controlador respetivo.

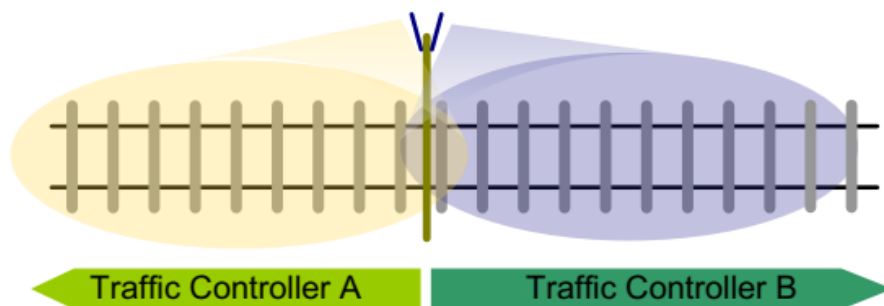


Figura 2.4 - Exemplo de separação de zonas de controlo (Retirado de [5]).

2.5. Limitações do GSM-R

Como já foi explicitado o GSM-R foi desenvolvido com o intuito de satisfazer as necessidades de comunicações móveis dos caminhos de ferro. O GSM-R é responsável pelo transporte de voz, dados e sinalização (ETCS) nas redes ferroviárias que recorrem a este sistema. Trata-se de uma tecnologia que já foi largamente implementada na Europa e no mundo. No entanto o GSM-R apresenta várias limitações, nomeadamente na sua baixa capacidade, na impossibilidade de suportar serviços de dados adicionais e também na sua pouca eficiência na utilização de recursos [1].

As três maiores limitações do GSM-R são constituídas por:

- **Baixa eficiência na utilização de recursos:** Nos caminhos de ferro boa parte da informação a ser transmitida é constituída por “bursts” de

mensagens de dados ETCS. No entanto o GSM-R é uma tecnologia que se baseia em comutação de circuitos, ideal para a transmissão contínua de informação. Dado que estamos a usar um sistema de comutação de circuitos é necessário manter o circuito estabelecido, ocupando desta forma um canal que é apenas usado para transmitir mensagens de dados ETCS de forma descontínua. Isto leva a que a eficiência do sistema seja baixa.

- **Capacidade insuficiente:** A falta de capacidade do GSM-R é bem notória em grandes centrais ferroviárias. Nestes locais podem existir grandes concentrações de comboios, que facilmente esgotam a capacidade do sistema, sendo necessário recorrer a estratégias e regras operacionais que moderem os problemas causados por esta falta de capacidade [2]. Esta insuficiência de capacidade tem três causas evidentes: falta de flexibilidade na interface rádio, espetro atribuído limitado e o facto de se tratar de uma tecnologia baseada em comutação de circuitos.
- **Suporte de Serviços de Dados:** O GSM-R suporta apenas serviços de transmissão de dados básicos. Um canal GSM-R apenas consegue transmitir informação a um ritmo de 9.6kbps, o atraso na rede ronda os 400ms e o tempo de conexão ronda os 7 s. Dadas estas limitações a utilização deste sistema para serviços interativos e de multimédia torna-se impraticável.

Tendo em conta as limitações descritas em cima, mas também o facto de a tecnologia GSM-R se aproximar do limite do seu ciclo de vida [9], é necessário considerar outras tecnologias que possam substituir o GSM-R e colmatar as suas limitações. Uma das alternativas propostas para a substituição do GSM-R é o LTE. No capítulo seguinte apresenta-se um resumo da tecnologia LTE assim como as características que tornam esta tecnologia uma possível alternativa ao GSM-R.

3. Tecnologia LTE

A tecnologia LTE possui características que a tornam ideal para suprir as lacunas que o GSM-R apresenta. Neste capítulo procede-se a uma apresentação global do LTE, das suas características e das técnicas que são utilizadas nesta tecnologia.

3.1. Introdução

O LTE é uma tecnologia de comunicações móveis que pretende disponibilizar um serviço altamente eficiente, com baixa latência, otimizado à comutação de pacotes e seguro [10]. A interface rádio deste sistema recorre ao *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) no *downlink* e *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) no *uplink*. Para aumentar os ritmos binários transmitidos o LTE recorre à utilização de sistemas *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) e a diversas modulações como *64 Quadrature Amplitude Modulation* (*64 QAM*). A arquitetura LTE é totalmente *Internet Protocol* (IP) [11].

3.2. Arquitetura de rede

A arquitetura do LTE evoluiu do UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*). Esta evolução inclui a interface rádio do LTE, o *Evolved - Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) que é, tal como o nome sugere, uma evolução do *Universal Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN) que é a interface rádio do UMTS. No entanto, o desenvolvimento não se restringiu apenas à interface rádio, tendo ocorrido progressos em toda a rede. O conjunto destes progressos é conhecido por “*System Architecture Evolution*” (SAE) e inclui o “*Evolved Packet Core*” (EPC) [12]. O “*Evolved Packet System*” (EPS) é constituído pelo EPC e pelo E-UTRAN.

Como já foi referido, o LTE funciona exclusivamente por comutação de pacotes e fornece uma ligação IP entre o utilizador *User Equipment* (UE) e uma rede do tipo “*Packet Data Network*” (PDN) como a internet. O EPS recorre a um portador para encaminhar o tráfego de uma “*gateway*” na PDN até ao UE.

Um portador EPS é um pacote de dados que tem associada uma determinada qualidade de serviço (QoS). Para o mesmo utilizador podem ser estabelecidos vários portadores, cada um com diferentes níveis de QoS. Cada um destes portadores fica associado a um serviço distinto, desta forma pode-se adequar o nível de QoS ao serviço. Por exemplo, uma chamada de voz necessita de um serviço com um nível de qualidade distinto daquele necessário à navegação na internet. Assim, à chamada de voz é atribuído um portador capaz de garantir os níveis de QoS adequados, por outro lado para a navegação na internet um portador do tipo “*best-effort*” é suficiente.

Na Figura 3.1 pode-se observar uma representação dos elementos de uma rede EPS assim como as diferentes interfaces que os unem. Esta rede é constituída pela sua rede “*core*” (CN – Core Network), que é o EPC, e pela sua interface rádio, o E-UTRAN [12]. O E-UTRAN é constituído pelo “*evolved*” NodeB (eNodeB) que é responsável pela ligação rádio com o UE. No caso do EPC a sua constituição é mais extensa, tal como se pode observar na mesma figura.

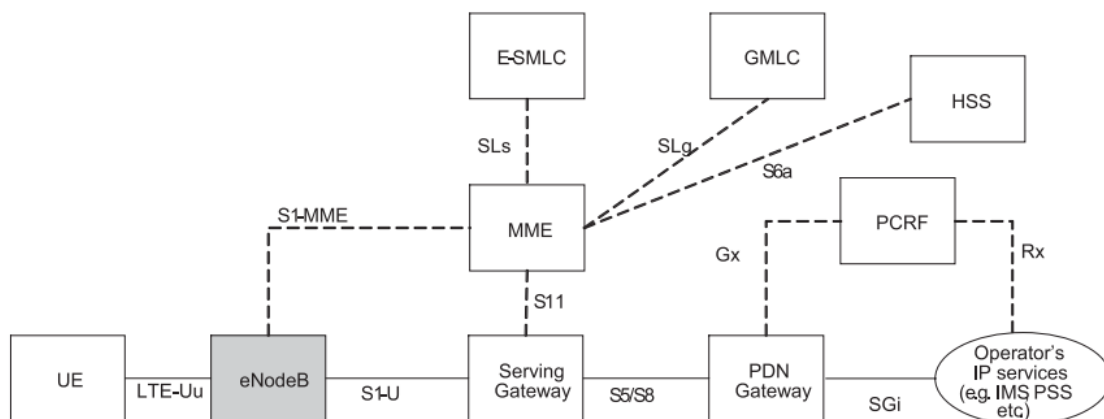


Figura 3.1 . Elementos da rede EPS (Retirado de [12]).

Uma descrição sumária dos elementos que integram o EPC é apresentada de seguida.

- **MME** (*Mobility Management Entity*) – Entidade responsável pela sinalização entre o UE e a CN.
- **HSS** (*Home Subscriber Server*) – Contém os dados e o perfil do utilizador e outros dados relativos a que redes o mesmo se pode ligar. Também identifica a qual MME se encontra ligado o utilizador.

- **PCRF** (*Policy Control and Charging Rules Function*) – Responsável pelo controlo da implementação de políticas nas tomadas de decisões. Fornece as autorizações de QoS que determinam como um determinado fluxo de dados é tratado e assegura que o tratamento que é dado a esses dados está de acordo com o perfil de subscrição do utilizador.
- **GMLC** (*Gateway Mobile Location Centre*) – Possibilita o suporte a serviços de localização. Após a devida autorização, envia pedidos de localização ao MME e recebe as estimativas de localização.
- **P-GW** (*PDN Gateway*) – Responsável pela atribuição dos endereços IP aos UE, assim como de garantir que o QoS é cumprido de acordo com as regras do PCRF. O P-GW é também responsável pela filtragem dos pacotes IP de *downlink* pelos diferentes portadores (baseados nos níveis de QoS).
- **S-GW** (*Serving Gateway*) – Todos os pacotes IP são transferidos através deste *gateway*. Assim, é usado para guardar a informação destinada a um determinado UE que esteja em processo de *handover* entre eNodeBs. O S-GW também é responsável por recolher informações sobre a faturação e pela escuta de chamadas quando tal é requisitado pelas autoridades judiciais.
- **E-SMLC** (*Evolved Serving Mobile Location Centre*) – É responsável pela coordenação e agendamento dos recursos necessários a localizar um UE que está ligado a E-UTRAN. É também o E-SMLC, que com base nas estimativas que recebe, procede ao cálculo da localização e da velocidade do UE assim como da precisão das mesmas.

3.3. Interface rádio

O LTE pretende ter gamas de funcionamento elevadas em vários parâmetros, tais como, raio de célula, velocidades, frequências e larguras de banda. Pretende-se assim suportar um número elevado de cenários para implementação do sistema. No entanto, para conseguir cobrir todas estas possibilidades, pode ser necessário parametrizar o sistema de

formas distintas, nomeadamente naquilo que diz respeito ao *delay spread* e a frequência de *Doppler*.

A configuração mais “normal” para o *downlink* usa uma distância entre subportadoras de 15kHz e Prefixo Cíclico (*Cyclic Prefix - CP*) de aproximadamente 5 μ s. É também possível configurar o LTE com uma CP de aproximadamente 17 μ s para fazer face a situações mais extremas [12].

Na configuração mais típica do LTE temos um CP de 4,7 μ s e um tempo de símbolo de 66,7 μ s que é 1/20 do pior período de coerência. Na Figura 3.2 - Período de símbolo OFDM pode-se observar a composição de um símbolo OFDM incluindo o respetivo CP.

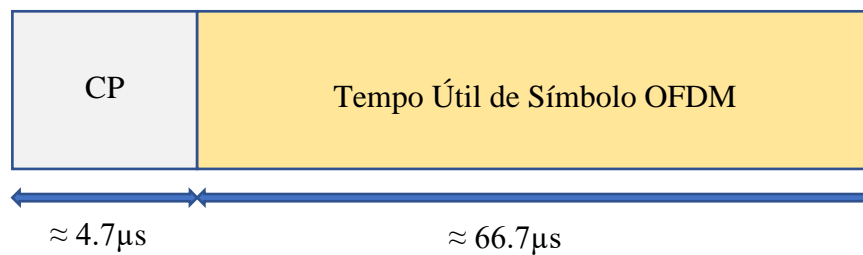


Figura 3.2 - Período de símbolo OFDM.

No OFDMA para cada utilizador é atribuído um conjunto de subportadoras por um determinado período. No entanto, nem todas as subportadoras são usadas para transmitir informação útil. Algumas das subportadoras são usadas para proceder à estimação do canal, dado que este varia constantemente. A estas subportadoras chamam-se de subportadoras piloto.

3.3.1. Partilha de recursos

Os recursos rádio em LTE são divididos em dois domínios, do tempo e da frequência. No domínio do tempo o intervalo mínimo está definido como $T_S = 1/30720000$ s, todos os outros intervalos de tempo em LTE são múltiplos deste.

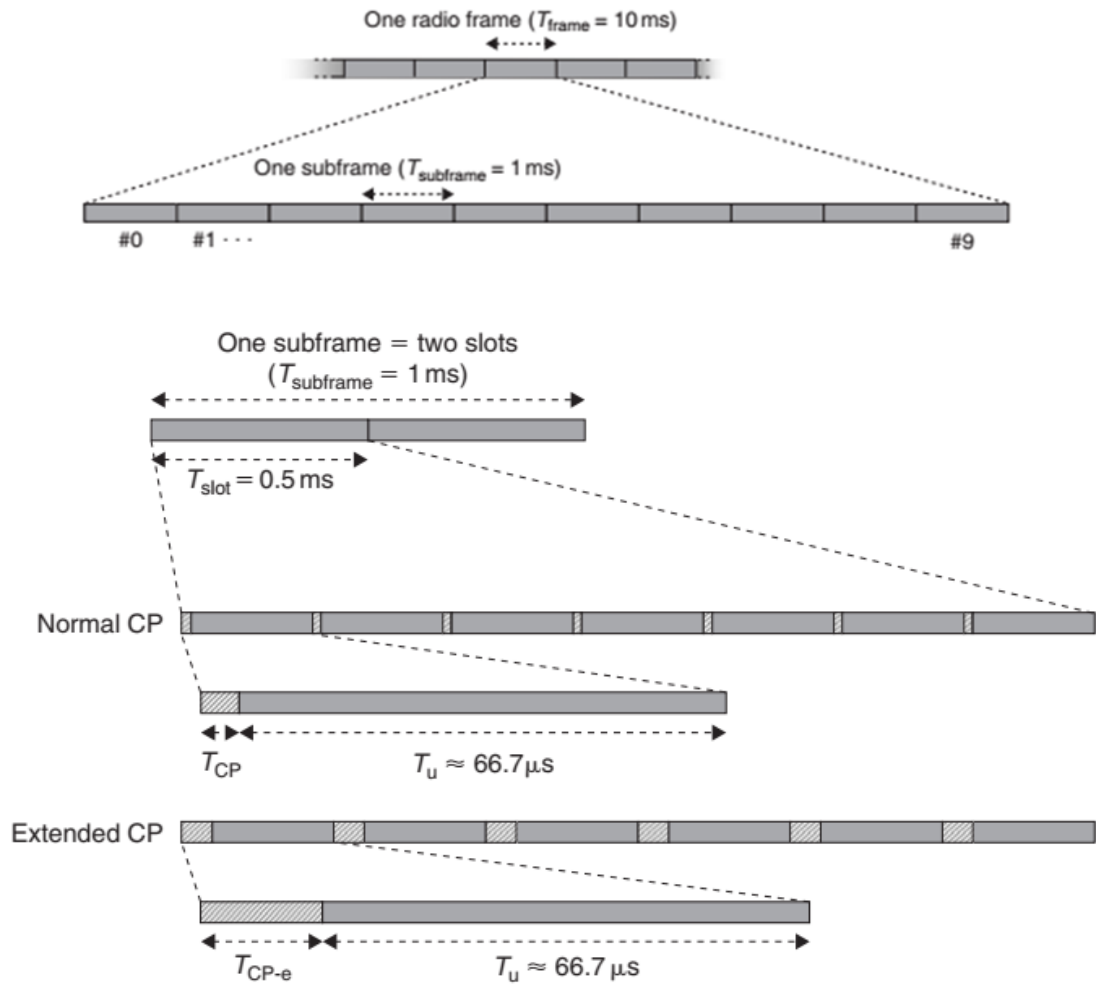


Figura 3.3 - Estrutura temporal do LTE (Retirado de [13]).

Os recursos rádio LTE, estão divididos em elementos básicos. Esta divisão é feita no domínio do tempo e da frequência. Estes elementos básicos são depois agrupados em blocos que por sua vez são distribuídos pelos diversos utilizadores do sistema mediante às necessidades individuais de cada utilizador.

Os elementos referidos são:

Resource Element (RE) – É o menor elemento de recursos que existe no LTE, ele é constituído pela menor unidade no domínio do tempo, um símbolo OFDM ($71.4 \mu\text{s}$), e pelo menor elemento no domínio da frequência, uma subportadora (15kHz).

Resource Element Group (REG) – É constituído pelo conjunto de quatro *resource elements*.

Resource Block (RB) – É constituído no domínio do tempo por 7 símbolos OFDM (um *Time Slot*) e no domínio da frequência por 12 subportadoras consecutivas. Um RB é constituído por 84 RE e estende-se ao longo de 0.5ms e 180kHz. Pode-se observar um RB na Figura 3.4 [14].

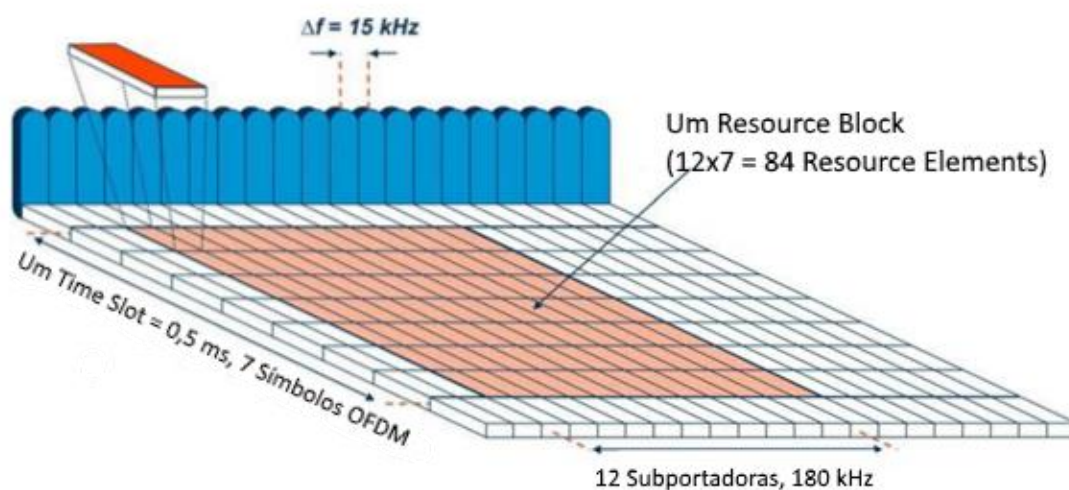


Figura 3.4 - Resource block, (Retirado de [14]).

O número de *resource blocks* existentes no sistema vai depender da largura de banda que o sistema tem disponível para utilizar. Na Tabela 3.1 apresenta-se o número de RB disponíveis para cada largura de banda disponível em LTE, na última coluna está também expresso o número de subportadoras existentes para cada um dos casos.

Tabela 3.1 - Número de RB e subportadoras em função da largura de banda.

Largura de Banda [MHz]	Número de RB	Número de Subportadoras
1,4	6	72
3	15	180
5	25	300
10	50	600
15	75	900
20	100	1200

Considerando os recursos disponíveis por cada RB, e o número total de RB, facilmente se determina as velocidades de transmissão disponíveis para cada caso. No ponto 3.4 deste documento faz-se a apresentação desses mesmos dados.

3.3.2. Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Os sistemas MIMO em alguns casos conseguem melhorar significativamente a performance dos sistemas rádio. No LTE existem vários modos de funcionamento dos sistemas MIMO e no geral eles necessitam de múltiplas antenas e de recorrer a técnicas como ganho de diversidade espacial ou ganho de *array*.

Os métodos usados pelos sistemas MIMO são:

- **Ganho de Diversidade:** Usa as diferentes réplicas recebidas do mesmo sinal enviado que foram provocadas pelo multi-percurso para melhorar a qualidade da informação recebida. Usando este método é possível melhorar os níveis de *Signal To Interference Plus Noise Ratio* (SINR).
- **Ganho de Array:** Procedendo à manipulação elétrica dos *arrays* de antenas disponíveis é possível distribuir a energia radiada pelas antenas para as zonas em que for mais útil.
- **Ganho por diversidade espacial:** Usando múltiplos fluxos de informação é possível multiplicar a quantidade de dados que são transmitidos.

As técnicas anteriores podem ser usadas nos seis modos distintos de MIMO que existem no LTE, como forma de melhorar a eficácia e eficiência do sistema.

3.3.3. Modulação e codificação

No LTE estão disponíveis diversas modulações e codificações. A escolha da combinação de cada uma destas características da transmissão rádio depende essencialmente das condições do canal rádio que se está a usar. Quanto melhores forem as condições do canal rádio, mais bits por Hertz se podem transmitir, o que melhora a eficiência espectral, e menor terá de ser a informação redundante transmitida. Estas características podem ser

alteradas dinamicamente ao longo da utilização do sistema de acordo com as variações sentidas no canal rádio.

A combinação mais restrita corresponde a uma modulação QPSK com uma codificação de $\frac{1}{2}$, o que significa que por cada dois bits de dados enviados apenas um corresponde a dados úteis, sem MIMO e com uma largura de banda de 1.4MHz, o que disponibiliza 6 RB. Este tipo de combinação modulação/codificação é utilizada nos casos em que as condições do sinal são mais extremas. Do lado oposto temos uma modulação 64QAM com uma codificação de um para um, com MIMO 4x4 e uma largura de banda de 20MHz. Este modo disponibiliza 100RB e todos os bits enviados correspondem a dados úteis. Para este modo ser usado o sinal deve apresentar um valor elevado de SINR. No próximo ponto verifica-se de que forma é que a combinação de todos estes parâmetros afeta o ritmo binário alcançado pelo sistema.

3.4. Ritmos de transmissão

O LTE possui a capacidade de utilizar uma grande variedade de larguras de banda, de modulações, de codificações e de configurações de antenas. Para cada combinação destes quatro fatores obtém-se um ritmo binário distinto. Isto verifica-se para o *uplink* assim como para o *downlink*. De seguida apresentam-se os dados relativos aos ritmos binários no *uplink* e no *downlink*. Os dados apresentados assumem que existem recursos que são usados para controlo e sinalização e como tal não são considerados para a determinação dos ritmos binários apresentados.

Na Tabela 3.2 representam-se os ritmos binários no *uplink*, que no caso menos favorável corresponde a uma largura de banda de 1.4MHz, uma modulação QPSK e com uma codificação de $\frac{1}{2}$. Esta combinação consegue atingir um ritmo binário máximo de 0.9 Mbps. Para a mesma modulação e codificação, mas com uma largura de banda de 20MHz obtém-se um ritmo binário de 14.4 Mbps. Passando para as modulações com mais símbolos temos o 64QAM. Esta modulação consegue transmitir 6 bits por símbolo, para um caso sem codificação, ou seja, em que todos os símbolos transmitidos são úteis os ritmos binários atingidos podem alcançar os 86.4 Mbps.

Tabela 3.2 - Ritmos de transmissão do LTE em uplink. (Retirado de [15]).

Modulação e Codificação	Bits/Símbolo	MIMO	Largura de Banda [MHz]					
			1.4	3.0	5.0	10	15	20
			Número de <i>Resource Blocks</i>					
			6	15	25	75	75	100
			Ritmo Binário [Mbps]					
QPSK ½	1.0	SISO	0.9	2.2	3.6	7.2	10.8	14.4
16QAM ½	2.0	SISO	1.7	4.3	7.2	14.4	21.6	28.8
16QAM ¾	3.0	SISO	2.6	6.5	10.8	21.6	32.4	43.2
16QAM 1/1	4.0	SISO	3.5	8.6	14.4	28.8	43.2	57.6
64QAM ¾	4.5	SISO	3.9	9.7	16.2	32.4	48.6	64.8
64QAM 1/1	6.0	SISO	5.2	13.0	21.6	43.2	64.8	86.4

Para o *downlink* o princípio é idêntico. Com uma largura de banda de 1.4MHz, usando a modulação QPSK com uma codificação de ½ o ritmo binário alcançado é de 0.8Mbps. Um valor ligeiramente mais baixo do que aquele possível no caso do *uplink* devido às diferenças no *overhead* da sinalização e controlo. Para uma modulação de 64QAM com uma largura de banda e codificação de 1/1, sem MIMO o ritmo binário alcança os 89.6Mbps. No caso da utilização de MIMO 4x4 os ritmos alcançados podem atingir um valor de 325.1Mbps, um valor quase quatro vezes superior àquele sem a utilização desta técnica.

Na Tabela 3.3 encontram-se representadas as velocidades teóricas de *downlink* atingidas pelo LTE para diversas configurações possíveis, de modulação, codificação, largura de banda (LB) e tipo de MIMO.

Tabela 3.3 - Ritmos de transmissão do LTE em downlink. (Retirado de [14]).

Modulação e Codificação	Bits/Símbolo	MIMO	Largura de Banda [MHz]					
			1.4	3.0	5.0	10	15	20
			Número de <i>Resource Blocks</i>					
			6	15	25	75	75	100
			Ritmo Binário [Mbps]					
QPSK ½	1.0	SISO	0.8	2.2	3.7	7.4	11.2	14.9
16QAM ½	2.0	SISO	1.5	4.4	7.4	14.9	22.4	29.9
16QAM ¾	3.0	SISO	2.3	6.6	11.1	22.3	33.6	44.8
64QAM ¾	4.5	SISO	3.5	9.9	16.6	33.5	50.4	67.2
64QAM 1/1	6.0	SISO	4.6	13.2	22.2	44.7	67.2	89.7
64QAM ¾	9.0	MIMO 2X2	6.6	18.9	31.9	64.3	96.7	129.1
64QAM 1/1	12.0	MIMO 2X2	8.8	25.3	42.35	87.7	128.9	172.1
64QAM 1/1	24.0	MIMO 4X4	16.6	47.7	80.3	161.9	243.5	325.1

4. LTE-R

A tecnologia LTE-R pretende ser a solução LTE para a ferrovia. Comparativamente o LTE-R está para o LTE assim como o GSM-R está para o GSM. Tendo em conta as características da tecnologia LTE apresentadas anteriormente, bem como os requisitos apresentados no capítulo 2, será efetuada a análise de desempenho da tecnologia LTE-R. Esta análise permitirá determinar a capacidade máxima expectável da tecnologia, permitindo já retirar algumas conclusões sobre a aplicabilidade à ferrovia e cumprimento dos respetivos requisitos.

As distinções entre o LTE e o LTE-R são as necessárias de modo a adaptar a tecnologia LTE ao ambiente ferroviário e às suas especificidades. As comunicações ferroviárias têm, necessariamente, de cumprir com parâmetros muito apertados de qualidade de serviço, tais como ritmo binário, atraso de transmissão e de *Bit Error Rate* (BER) [3]. O LTE-R também apresenta excelentes soluções para suprir os desafios dos serviços necessários nas comunicações ferroviárias.

4.1. Ritmo de transmissão

A velocidade do UE influencia consideravelmente, de forma negativa, as condições de receção e mesmo de emissão do sinal rádio. Este facto é particularmente crítico no LTE-R visto que o sistema tem de estar equipado para funcionar com velocidades de até 500km/h. Na Figura 4.1 estão representadas cinco curvas distintas. Cada uma delas apresenta o débito binário em função da relação sinal ruído (SNR) para uma determinada velocidade. As cinco curvas dizem respeito às seguintes velocidades: 3, 30, 120, 240, e 350km/h. Os dados apresentados são percentagens relativas aos ritmos binários de pico atingidos pelo sistema LTE que foi modelado. Estes dados foram disponibilizados pelo LTE/SAE *Trial Initiative* (LSTI), um grupo mundial de operadores de telecomunicações e fornecedores de equipamentos criado para harmonizar a evolução do standard LTE para o seu lançamento comercial. Os dados apresentados são o resultado de ensaios realizados por seis fornecedores de equipamentos LTE e representam os resultados medidos em vários ensaios tanto em laboratório como no terreno [16].

Verifica-se que os dados que constam na Figura 4.1 não contêm a totalidade da gama de valores de velocidades que são necessárias ao LTE-R. Tendo isso em vista, foi criado o gráfico que se apresenta na Figura 4.2. Neste gráfico apresenta-se também os resultados para velocidades de 450km/h e 500km/h. As novas curvas apresentadas foram obtidas por extrapolação. A extrapolação foi realizada recorrendo a Excel e usando como parâmetros de entrada as curvas representadas no gráfico da Figura 4.1. Os ficheiros Excel usados nestes cálculos encontram-se nos anexos de *software*.

Observando o gráfico da Figura 4.2, verifica-se que à velocidade de 500km/h e com um excelente SNR o desempenho do sistema está próximo de 50% do seu valor de pico. Por outro lado, quando o SNR atinge valores mais baixos os ritmos binários encontram-se entre os 20% e os 40% dos valores de pico. Este facto verifica-se para qualquer uma das sete velocidades representadas no gráfico.

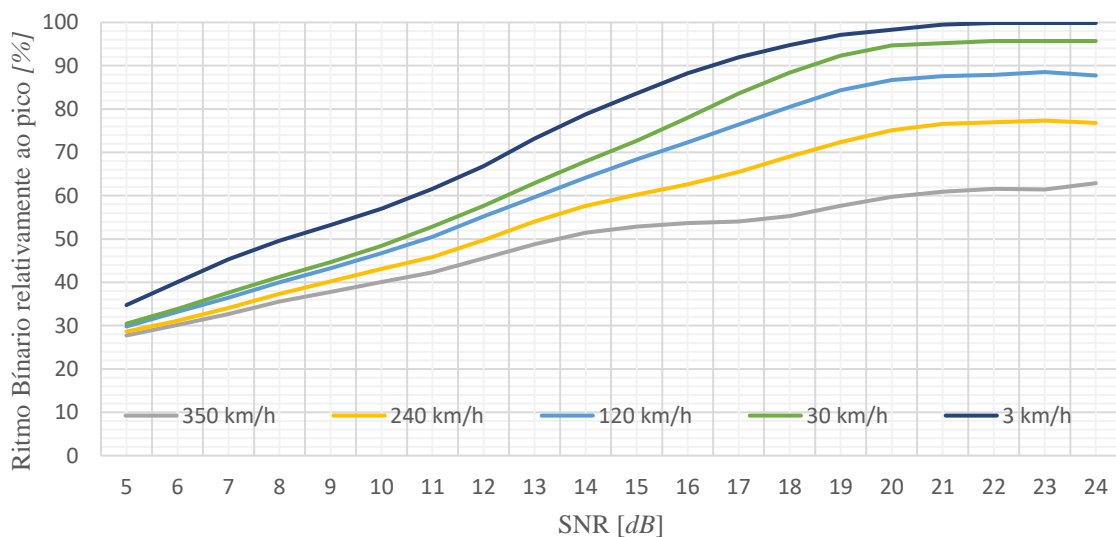


Figura 4.1 - Variação do débito, em percentagem do valor de pico, em função do SNR. (Retirado de [16]).

Com base na informação que se obteve a partir da Figura 4.1 e da Figura 4.2 é possível determinar qual o impacto que a velocidade tem no ritmo binário. Neste ponto é necessário determinar qual o ritmo de transmissão máximo que é possível atingir para cada ponto da linha férrea. Para tal, vamos considerar as múltiplas condicionantes existentes para a determinação do ritmo binário em LTE e excluem-se as questões relacionadas com a velocidade.

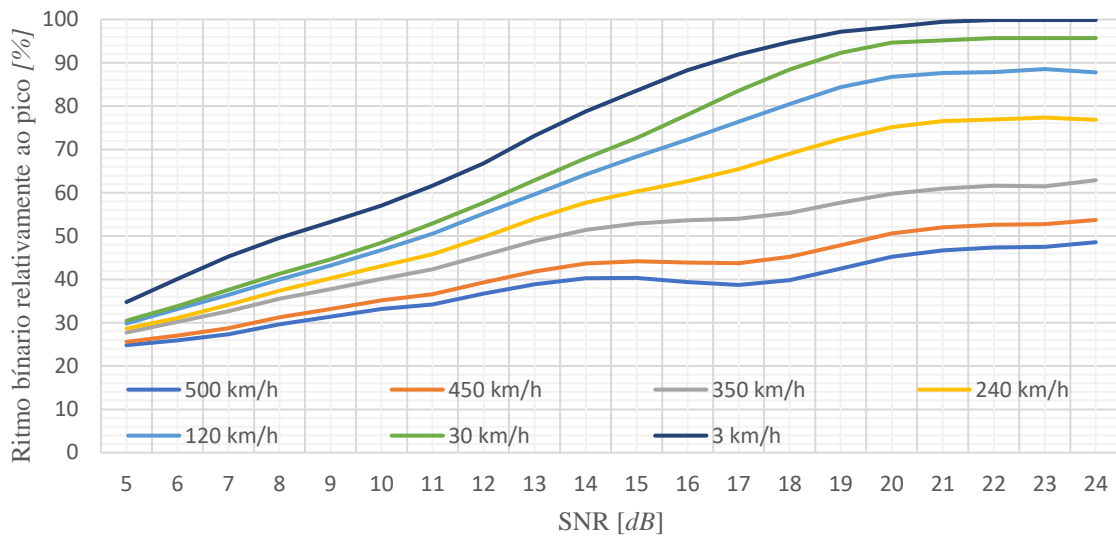


Figura 4.2 – Variação do débito, em percentagem do valor de pico, em função do SNR para velocidades até 500km/h..

Em LTE, como já foi apresentado neste documento, o ponto de partida para obter o ritmo binário de um sistema é obter o seu SINR. No caso em particular que estamos a estudar, o LTE-R, vai-se determinar o SINR para cada ponto da linha férrea. Tendo o valor do SINR e aplicando um algoritmo adequado obtém-se o ritmo binário para cada um dos pontos pretendidos.

Na Tabela 4.1, apresentam-se os valores mínimos de SINR para cada combinação de modulação e taxa de código utilizados no LTE. Para cada modulação é considerada uma margem de implementação (IM) cujo propósito é absorver as diferenças entre o SINR teórico e o SINR resultante na implantação do sistema no terreno. A cada uma destas combinações corresponde um ritmo binário específico, de acordo com a Tabela 3.3 Assim, fazendo o mapeamento do SINR à modulação e à taxa de código correspondente obtém-se o ritmo binário do sistema para cada ponto da linha em estudo.

Tabela 4.1 - Requisitos de SINR (Retirado de [12]).

Modulação	Taxa de Código	SINR (dB)	IM (dB)	SINR+IM (dB)
QPSK	1/8	-5.1	2.5	-2.6
	1/5	-2.9		-0.4

	1/4	-1.7		0.8
	1/3	-1		1.5
	1/2	2		4.5
	2/3	4.3		6.8
	3/4	5.5		8.0
	4/5	6.2		8.7
16 QAM	1/2	7.9	3	10.9
	2/3	11.3		14.3
	3/4	12.2		15.2
	4/5	12.8		15.8
64 QAM	2/3	15.3	4	19.3
	3/4	17.5		21.5
	4/5	18.6		22.6

O algoritmo usado para relacionar o SINR (γ) com o ritmo binário por *resource block* (R_{RB}) tem por base o princípio apresentado no parágrafo anterior. O algoritmo foi desenvolvido recorrendo a um conjunto de simulações e usa um conjunto de parâmetros semi-empíricos designados por a_0 , a_1 , a_2 e a_3 . As expressões que relacionam o R_{RB} com o γ são definidas pelas equações (4.1) e (4.2) [17].

$$R_{RB} = \begin{cases} a_3 + (a_0 - a_3) \times e^{\ln(2) \times \left(\frac{\gamma - a_1}{a_2}\right)^2}, & \gamma < a_1 \\ 0, & \gamma \geq a_1 \end{cases}$$

(4.1)

$$\gamma = a_1 - a_2 \times \frac{\sqrt{\ln\left(\frac{a_0 - a_1}{R_{RB} - a_3}\right)}}{\ln(2)}, 0 \leq R_{RB} \leq a_0$$

(4.2)

Após a determinação do ritmo binário considera-se um último fator, a velocidade do UE. Assim, e usando os dados do gráfico representado na Figura 4.2, obtém-se o resultado do ritmo binário que já inclui o impacto no sistema devido à velocidade de deslocação do equipamento móvel.

4.2. Simulação de ritmos de transmissão em *downlink*

Para se proceder à simulação do sistema LTE de modo a se determinarem os ritmos binários em *downlink*, usou-se o método apresentado em [17]. Para implementar o método referido usaram-se ferramentas desenvolvidas em MatLab e em Excel. Todas estas ferramentas encontram-se disponíveis nos anexos de *software*.

Com as simulações aqui realizadas, pretende-se apresentar um ponto de referência das capacidades e do comportamento desta tecnologia. São apresentadas várias simulações em duas frequências distintas 450MHz e 900MHz. Mais à frente neste documento ficará claro o porque destas duas frequências. As simulações apresentadas têm em conta um ambiente suburbano.

Na Figura 4.3 apresenta-se um dos gráficos obtidos pelas ferramentas desenvolvidas, este gráfico relaciona a atenuação do canal rádio em função da distância entre os dois pontos, o emissor e o recetor, para as frequências de 450MHz e 900MHz. Os resultados obtidos são os espectáveis, com uma atenuação superior no caso da frequência superior. Os valores de atenuação para uma distância de 3.5km situam-se nos 137dB no caso da frequência de 900MHz e de 135dB para a frequência de 450MHz. As duas curvas seguem uma trajetória idêntica, sendo separadas por aproximadamente dois dB em cada ponto.

Nas simulações subsequentes determina-se o ritmo binário em função do raio. Foram realizadas múltiplas simulações, cada uma delas com condições distintas de frequência e de largura de banda. Nos próximos dois gráficos apresentam-se quatro das simulações realizadas, as suficientes para apresentarmos o comportamento do sistema perante as

condições simuladas. No primeiro caso, representado no gráfico da Figura 4.4, foi usada uma largura de banda de 1.4MHz. Trata-se da menor largura de banda que é possível usar em LTE e é constituída por 6 RB.

Verifica-se que, com o aumento da distância, existe uma clara diminuição do ritmo binário alcançado. Este comportamento observa-se nas duas curvas, mas é particularmente evidente no caso da frequência mais elevada, tal como se esperava.

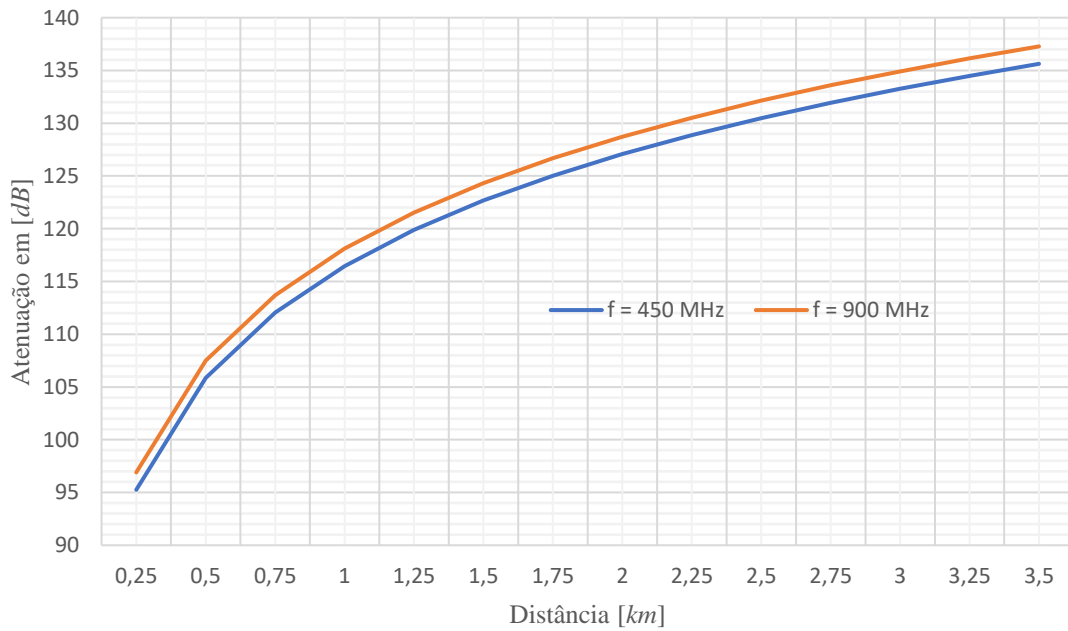


Figura 4.3 – Atenuação em função da distância entre o emissor e o recetor para $f=450\text{MHz}$ e $f=900\text{MHz}$.

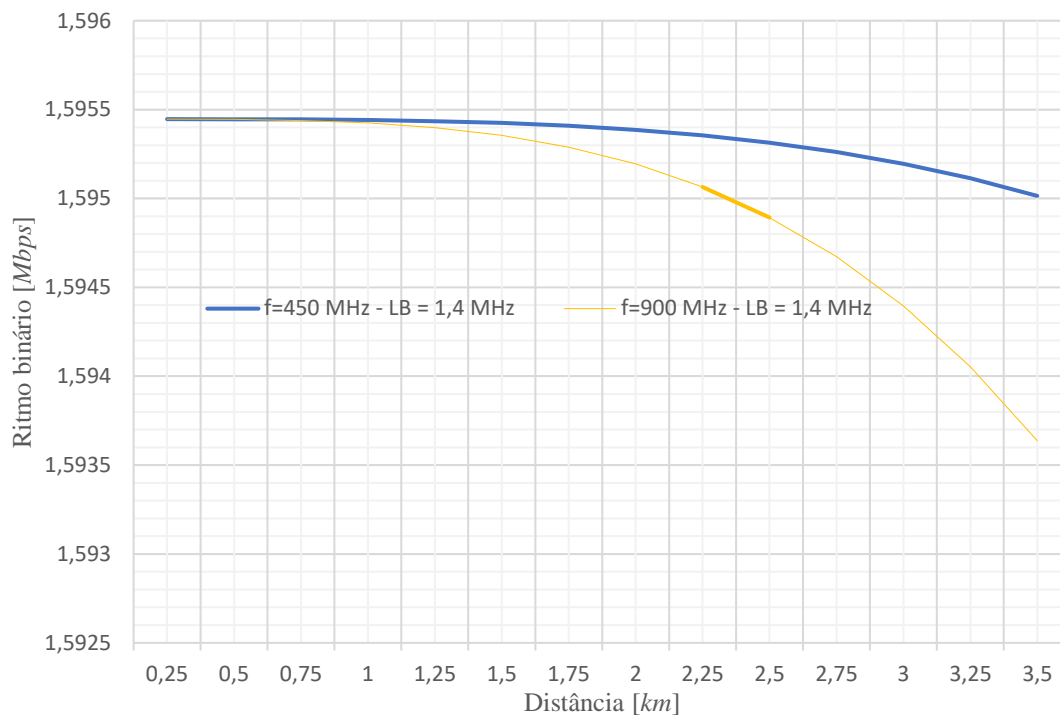


Figura 4.4 – Ritmo binário em função do raio para $f=450\text{MHz}$ e $f=900\text{MHz}$ com $LB = 1.4\text{MHz}$.

Para as mesmas frequências, mas aumentando a largura de banda para o patamar seguinte disponível em LTE (3MHz), obtiveram-se os resultados apresentados no gráfico da Figura 4.5. Verifica-se que, tal como seria espectável, o ritmo binário aumentou consideravelmente. Para a largura de banda considerada, o sistema LTE disponibiliza 15 RB, mais do dobro do caso anterior. Não constitui, portanto, uma surpresa que os resultados do ritmo binário também eles sejam superiores ao dobro do caso anterior. No entanto, a responsabilidade desta melhoria do ritmo binário não se deve exclusivamente ao aumento do número de RB, mas também ao facto de apesar de duplicarmos o número destes não necessitamos de duplicar a sinalização necessária ao funcionamento do sistema.

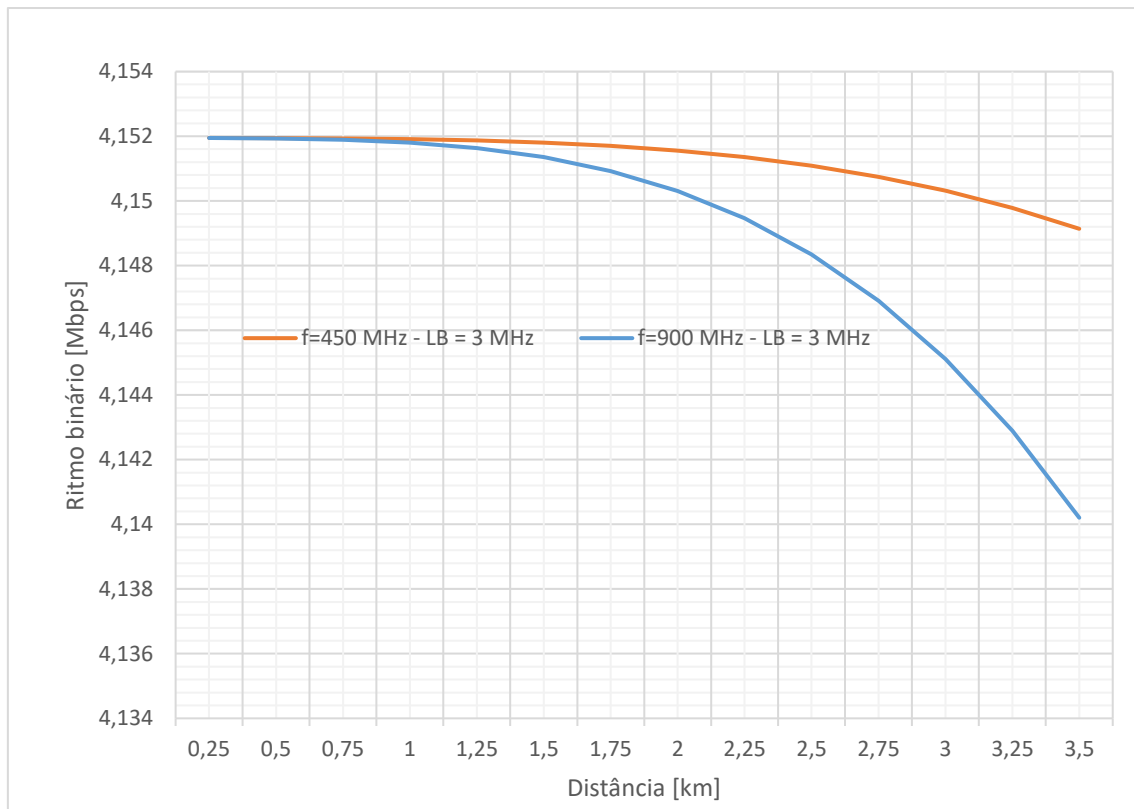


Figura 4.5 - Ritmo binário em função do raio para $f=450\text{MHz}$ e $f=900\text{MHz}$ com $LB = 3\text{MHz}$.

Como se pode observar nos gráficos apresentados nas Figura 4.4 e Figura 4.5, os resultados obtidos nas simulações estão dentro dos valores teóricos. Mas verifica-se que sobre condições de propagação mais realistas existe uma queda do ritmo de transmissão. Assim os valores de ritmo binário obtidos para as condições de propagação já apresentadas, aproximam-se dos 1.6Mbps com uma largura de banda de 1.4MHz e de 4.1Mbps no caso de se utilizar uma largura de banda de 3MHz.

4.3. Dimensionamento da ligação

O planeamento de cobertura é um dos passos fundamentais deste estudo pois permite determinar o raio de célula e conseqüentemente o número de células necessárias para servir uma determinada área geográfica. Dá-se início a este planeamento com o dimensionamento das ligações ascendente e descendente.

Para o dimensionamento da ligação é usada a metodologia apresentada em [17]. Trata-se de um método de dimensionamento muito versátil e que permite abordar a questão de diversas perspectivas, o que a torna ideal para este estudo. Outra das características do

método de dimensionamento escolhido é o fato de parte do seu mecanismo se basear em parâmetros empíricos e não puramente teóricos. É esse o espírito que se pretende ter refletido na abordagem ao tema em estudo.

Este método parte do princípio de que se verificam as seguintes condições:

- Todos os UE estão equipados com duas antenas;
- Todos os RB são transmitidos com a mesma potência, incluindo os canais de sinalização;
- O método usado para converter o SINR em ritmo binário já considera toda a sinalização da camada física;
- O MIMO é considerado apenas na ligação descendente e com um limite máximo de duas antenas;
- Na ligação ascendente o controlo de potência em circuito aberto não é modelado.

O processo de dimensionamento está representado no fluxograma da Figura 4.6 e inicia-se com a definição dos requisitos pretendidos, assim como das características do sistema a implementar. Em qualquer uma das fases de dimensionamento, caso os resultados não satisfaçam os requisitos pretendidos, deve-se reiniciar o estudo adaptando o sistema de modo a satisfazer os requisitos.

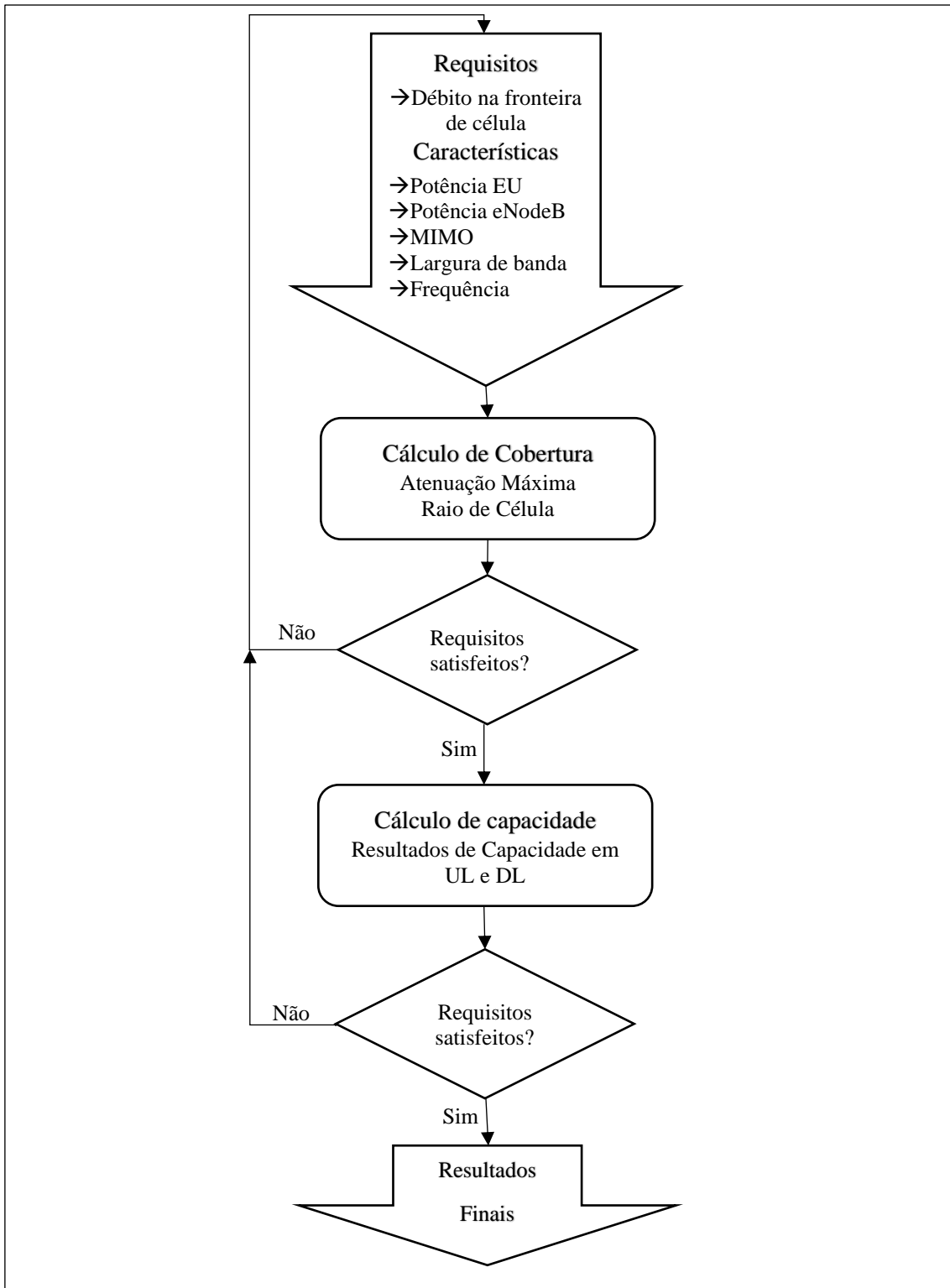


Figura 4.6 – Fluxograma do processo de dimensionamento (Retirado de [17]).

4.3.1. Ligação ascendente

O método de dimensionamento, usualmente, inicia-se com o *linkbudget* da ligação ascendente, o resultado será o raio de célula máximo que cumpre com os requisitos que foram estabelecidos no início do dimensionamento. Assim, antes de se iniciar o processo de dimensionamento é necessário definir os parâmetros e requisitos.

Considerando os dados relativos aos parâmetros dos sistemas de GSM-R e aos do LTE-R constantes em [3] e em [18] vamos considerar os seguintes parâmetros de entrada para o dimensionamento do sistema:

- Largura de banda de 1.4MHz;
- Ritmo binário de *uplink* na fronteira de célula de 0.5Mbps com uma probabilidade de cobertura de 95%;
- Potência do UE de 33dBm;
- Potência do eNodeB 45.8 dBm;
- Frequência de 900MHz;
- MIMO 2x2.

O ambiente de propagação considerado será rural, os parâmetros de ganhos, margens e atenuações considerados serão os típicos dos ambientes ferroviários. Para determinar a distância máxima de propagação, tendo em conta o valor de atenuação máxima obtido, usa-se o modelo de *Okumura-Hata*, descrito por:

$$\begin{aligned} L_{[dB]} = & 69.55 + 26.16 \times \log(f_{[MHz]}) \\ & \times 13.82 \cdot \log(h_{be[m]}) + (44.9 - 6.55 \times \log(h_{be[m]})) \times \log(d_{[km]}) \\ & - a(h_m) \end{aligned} \tag{4.3}$$

onde,

$$L_{[dB]} \quad - \text{Atenuação};$$

f	- Frequência;
h_{be}	- Altura do eNodeB;
h_m	- Altura do equipamento móvel;
d	- Distância.

e $a(h_m)$ é um termo corretivo para a altura do equipamento móvel e que depende do ambiente de propagação e da frequência sendo dado por:

$$a(h_m) = \begin{cases} (1.1 \times \log(f_{[MHz]}) - 0.7) \times h_{m[m]} - (1.56 \times \log(f_{[MHz]}) - 0.8), & \text{ambiente suburbano} \\ 8.29 \times \log^2(1.54 \times h_{m[m]}) - 1.10, & f \leq 200MHz \text{ e ambiente urbano} \\ 3.20 \times \log^2(11.75 \times h_{m[m]}) - 4.97, & f \geq 400MHz \text{ e ambiente urbano} \end{cases} \quad (4.4)$$

Para se obterem estimativas mais precisas devem ser considerados vários fatores corretivos. Neste estudo consideram-se os fatores corretivos referentes aos ambientes de propagação de áreas abertas, quase abertas e suburbanas, representados por respetivamente por Q_o , Q_r e K_{mr} e que são determinados pelas seguintes equações:

$$Q_o(f)_{[dB]} = 4.78 \times \log^2(f_{[MHz]}) - 18.33 \times \log(f_{[MHz]}) + 40.9 \quad (4.5)$$

$$Q_r(f)_{[dB]} = K_o(f)_{[dB]} - 5 \quad (4.6)$$

$$K_{mr}(f)_{[dB]} = 2 \times \log^2\left(\frac{f_{[MHz]}}{28}\right) + 5.4 \quad (4.7)$$

Obtém-se assim a expressão final para a atenuação, apresentada em (4.8).

$$L_{Total[dB]} = L_{[dB]} - \sum \text{fatores correctivos} \quad (4.8)$$

O método usado para o dimensionamento recorre a várias equações para determinar os diversos parâmetros. Para a ligação ascendente existem três parâmetros imprescindíveis, são eles a sensibilidade no eNodeB, a margem de interferência e a margem de desvanecimento Log-Normal. De seguida apresentam-se as equações que os definem.

A sensibilidade no eNodeB é dada pelas equações (4.9) e (4.10).

$$S_{eNodeB} = N_t + N_f + 10 \cdot \log(W_{RB}) + \gamma \quad (4.9)$$

$$S_{eNodeB} = N_{RB_UL} + \gamma \quad (4.10)$$

onde,

- N_t - Densidade espectral de potência de ruído térmico;
- N_f - Figura de ruído do recetor de eNodeB;
- W_{RB} - Largura de banda por *resource block*;
- γ - SINR;
- N_{RB_UL} - Ruído térmico por *resource block* na ligação ascendente.

A margem de interferência é determinada recorrendo a:

$$B_{IUL} = \frac{1}{1 - \gamma \times Q_{UL} \times F} \quad (4.11)$$

Onde,

- Q_{UL} Volume de carga do sistema no *uplink*;
- F Parâmetro empírico que relaciona os sinais da antena emissora e das suas interferentes.

A margem de desvanecimento Log-Normal tem de ser dimensionada considerando que se está em ambiente ferroviário. Como tal os requisitos de cobertura devem ser considerados para cada intervalo de 100m. Assim a equação que descreve este parâmetro é dada por:

$$B_{LNF} = \sigma_{LNF} \times x \quad (4.12)$$

em que,

- σ_{LNF} - Desvio padrão característico do ambiente de propagação;
- x - Abissa do valor de probabilidade de cobertura da função cumulativa de probabilidade Log-Normal.

Na fase final do dimensionamento através da equação (4.13) onde se aplicam os parâmetros anteriores, determina-se a atenuação máxima que permite obter o ritmo binário de dimensionamento. Aplicando o valor de L_{pmax} na equação (4.3) obtém-se o raio de célula máximo.

$$L_{pmax} = P_{UE_RB} - S_{eNodeB} - B_{IUL} - B_{LNF} + G_a \quad (4.13)$$

Onde,

- P_{UE_RB} - Potência emitida por RB no EU;
- G_a - Ganho das antenas.

Com os variados requisitos e parâmetros devidamente definidos realizou-se o *linkbudget* da ligação ascendente que está representado na Tabela 4.2. Neste dimensionamento considerou-se que se pretende que o sistema atinja um ritmo de transmissão de 0.5 Mbps. Este valor é superior aquele alcançado pelo GSM-R mas encontra-se dentro das capacidades do LTE. Tendo este objetivo como parâmetro de entrada considera-se que o mesmo deve ser alcançado recorrendo a 5 dos 6 RB disponibilizados pelos 1.4MHz de largura de banda disponível, atingido assim 84% do volume de carga do sistema. Isto leva a que cada RB deva atingir um ritmo binário de 100kbps, de modo a que na totalidade

sejam atingidos os 0.5Mbps. Para que este ritmo seja passível de ser atingido determinou-se através da equação (4.2) que o SINR não deve ser inferior a 1.057dB.

Dado que o ambiente de propagação é rural o desvio padrão considerado é de 5.5, o que para uma probabilidade de cobertura de 95% implica uma margem de desvanecimento Log-Normal de 9.075dB obtida através da equação (4.12). Por fim, recorrendo às equações (4.13) e (4.3) determina-se respetivamente o L_{pmax} e a distância máxima da ligação.

Tabela 4.2 - Linkbudget da ligação ascendente.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades de Medida
Largura de Banda do Sistema	LB	1.4	MHz
Número de RB	nRB	6	
Número de RB para dimensionamento do UL	$n'RB$	5	
Potência EU	P_{UE}	23	dBm
Potência do UE por RB	$P_{UE,RB}$	16,01	dBm
Fator de ruído do eNodeB	N_f	2,5	dB
Ruído térmico por RB	$N_{RB,UL}$	-118,95	dBm
Ritmo binário por RB para dimensionamento do UL	$R_{RB,UL}$	100	kbps
SINR	γ	1,057	dB
Sensibilidade do eNodeB	S_{eNodeB}	-117,89	dBm
Volume de Carga do Sistema	Q_{UL}	84	%
Fator F	F	0,7	

Margem de Interferência	B_{IUL}	6.02	dB
Ganho das Antenas	G_a	18.5	dBi
Margem de desvanecimento Log-Normal	B_{LNF}	9.075	dB
Atenuação Máxima	L_{pmax}	137,31	dB
Distância Máxima	d_{max}	6,84	km

A distância obtida de 6.84km é elevada. Este valor ocorre dado que o ritmo binário para o qual estamos a efetuar o estudo é razoavelmente baixo, permitindo que o SINR necessário seja também ele baixo. Este fato combinado com o de se estar a considerar um ambiente de propagação favorável leva a que esta distância seja possível de alcançar.

4.3.2. Ligação descendente

O valor da atenuação máxima obtido no ponto anterior é o ponto de partida para o cálculo do *linkbudget* da ligação descendente. Para a elaboração deste procedimento o método utilizado prevê a determinação de diversos parâmetros, são eles a margem de interferência, a atenuação do sinal no limite da célula, a sensibilidade do UE e o SINR no limite da célula. Em baixo são introduzidas as equações que definem os parâmetros referidos.

A sensibilidade no EU determina-se através da equação (4.14).

$$S_{UE} = N_t + N_{f_UE} + 10 \cdot \log(W_{RB}) + \gamma_{cellRange} [dB] \quad (4.14)$$

$$S_{UE} = N_{RB_DL} + \gamma [dB] \quad (4.15)$$

onde,

N_{f_UE} - Figura de ruído do recetor do eNodeB;

$\gamma_{cellRange}$ - SINR na fronteira da célula;

N_{RB_DL} - Ruído térmico por *resource block* na ligação descendente.

A margem de interferência é determinada recorrendo a:

$$B_{IDL} = 1 + \frac{P_{tx_RB} \times Q_{DL} \times F_c}{N_{RB_DL} \times L_{sa_cellRange}} \quad (4.16)$$

onde,

P_{tx_RB} - Potência transmitida por *resource block*;

Q_{DL} - Volume de carga do sistema no *downlink*;

F_c - Parâmetro que relaciona os sinais da antena emissora e das suas interferentes próximo da fronteira de célula;

N_{RB_DL} - Ruído térmico por *resource block* na ligação descendente;

$L_{sa_cellRange}$ - Atenuação do sinal na fronteira da célula.

A atenuação na fronteira de célula determina-se através de:

$$L_{sa_cellRange} = L_{pmax} - G_a [dB] \quad (4.17)$$

A equação (4.18) define o SINR na fronteira da célula.

$$\gamma_{cellRange} = P_{tx_RB} - L_{pmax} - N_{RB_DL} - B_{IDL} + G_a [dB] \quad (4.18)$$

onde,

G_a - Ganho das antenas.

A expressão que representa a atenuação máxima é expressa pela equação seguinte:

$$L_{pmax} = P_{tx_RB} - S_{UE} - B_{IDL} - B_{LNF} + G_a [dB] \quad (4.19)$$

Com os diferentes parâmetros definidos, realiza-se o *linkbudget* para a ligação descendente. Os parâmetros e resultados obtidos encontram-se expressos na Tabela 4.3. Os cálculos iniciam-se com a determinação do $L_{sa_cellRange}$ através da equação (4.17) que usa o valor da atenuação máxima da ligação de 137.3dB determinados no *linkbudget* da ligação descendente, obtendo-se um valor de 118.8dB. De seguida, determina-se a margem de interferência usando a equação (4.16), de onde resulta um valor de 34.27dB. Com estes dois elementos determinados é possível usar a equação (4.2) para determinar o SINR na fronteira da célula cujo valor é -9.68dB. Recorrendo a equação (4.1) obtém-se o ritmo binário correspondente ao SINR, que neste caso corresponde a 10.45kbps na fronteira de célula.

Tabela 4.3 - Linkbudget da ligação descendente.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades de Medida
Atenuação Máxima	L_{pmax}	137,30	dB
Margem de desvanecimento Log-Normal	B_{LNF}	9.075	dB
Ganho das Antenas	G_a	18.5	dBi
Atenuação do Sinal no limite da célula	$L_{sa_cellRange}$	118,81	dB
Potência eNodeB		38	W
Potência por RB DL	P_{RB_DL}	6,33	W
Fator F, para o limite de célula	F_{cell_edge}	2,3	
Volume de carga do sistema DL	Q_{DL}	50	%

Margem de Interferência	B_{IDL}	34,27	dB
Sensibilidade de UE	S_{UE}	-124,13	dBm
Noise fator UE	$N_{\ell UE}$	7	dB
Ruido térmico por RB		-114,45	dBm
SINR no limite da célula	$\gamma_{celledge}$	-9,68	dB
Ritmo binário por RB no limite de célula	$R_{RB_cellEdge}$	10,45	kbps
Número de RB	n_{RB}	6	

O ritmo binário obtido na fronteira da célula é de 10.45kbps, no entanto, o valor médio da célula será bastante superior. Para a determinação desse valor é necessário proceder-se a alguns cálculos adicionais. Inicia-se este passo pelo cálculo do valor médio de interferência, que pode ser determinada por:

$$B_{DL_noiseRise} = 1 + \frac{P_{tx_RB} \times Q_{DL} \times F}{N_{RB_DL} \times L_{sa_cellRange}} \quad (4.20)$$

$$\gamma_{DL_ave} = \frac{P_{tx_RB}}{B_{DL_noiseRise} \times N_{RB_DL} \times H \times L_{sa_cellRange}} \quad (4.21)$$

onde,

H Representa o fator de atenuação médio que é o rácio entre a atenuação média na célula e a atenuação na fronteira da célula. Para efeitos de dimensionamento é recomendando o valor de 0.36.

A partir do valor médio de interferência determina-se o valor médio do SINR recorrendo a equação (4.21). O resultado é aplicado na equação (4.1) obtendo-se o ritmo binário

médio por RB na ligação descendente. Adicionalmente pode determinar-se o ritmo médio na célula através de:

$$R_{avg_DL} = nRB \times R_{RB_DL} \quad (4.22)$$

Aplicando a metodologia introduzida no ponto anterior obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 4.4. Verifica-se que o valor do SINR médio têm um valor consideravelmente superior ao SINR na fronteira de célula, atingindo neste caso os 9 dB em comparação com os -9.7dB obtidos na fronteira de célula. Este valor de SINR permite usar modelações e códigos mais favoráveis o que se traduz num ritmo binário por RB consideravelmente mais elevado, atingindo os 340kbps. O que resulta num débito binário na célula de 2Mbps.

Tabela 4.4 - Cálculo da capacidade na ligação descendente.

Capacidade			
Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades
Fator H	H	0,36	
Fator F médio	F_{avg}	0,7	
Ruído interferente médio	$B_{DL_noiseRise}$	29,1	dB
SINR médio	γ_{DL_ave}	8,99	dB
Ritmo binário por RB	R_{RB_DL}	339,79	kbps
Ritmo binário médio na célula	R_{avg_DL}	2,04	Mbps

4.4. Capacidade em função da distância.

Usando como ponto de partida um caso idêntico ao do *linkbudget* da ligação descendente, e recorrendo a mais um dos métodos apresentados em [17], determina-se para 100 pontos entre a fronteira de célula e a antena, qual o ritmo binário por RB. O processo inicia-se pela determinação do L_{sa_i} para cada um dos 100 pontos intermédios. Para proceder ao cálculo do L_{sa_i} usa-se a expressão apresentada na equação seguinte:

$$L_{sa_i} = L_{sa_cellRange} + 10 \times n \times \log\left(\frac{d_i}{d_{max}}\right) [dB] \quad (4.23)$$

onde,

- n - Coeficiente de decaimento;
- d_i - Distância no ponto i ;
- d_{max} - Distância máxima da ligação.

O SINR para cada ponto i é determinado por:

$$\gamma_i = \frac{1}{Q_{DL} \times F_i + \frac{N_{RB_DL} \times L_{sa_i}}{P_{tx_RB}}} \quad (4.24)$$

em que,

- F_i Parâmetro F para o ponto i .

Tem-se agora todos os dados necessários para o cálculo do ritmo binário por RB para cada ponto i , para tal basta usar a equação (4.1) para cada um dos pontos. Os resultados podem ser observados no gráfico da Figura 4.7. O gráfico contém as curvas do ritmo binário por RB esperado para velocidades até aos 500km/h. Da análise do gráfico conclui-se que, até uma distância de 700m da estação base, o ritmo binário se mantém estável. A partir desse ponto começa a verificar-se uma diminuição do ritmo e uma menor diferença entre os ritmos binários para cada velocidade. No limite de célula o ritmo baixa

consideravelmente e a diferença do ritmo obtido para cada uma das diferentes velocidades estudadas torna-se mais pequena.

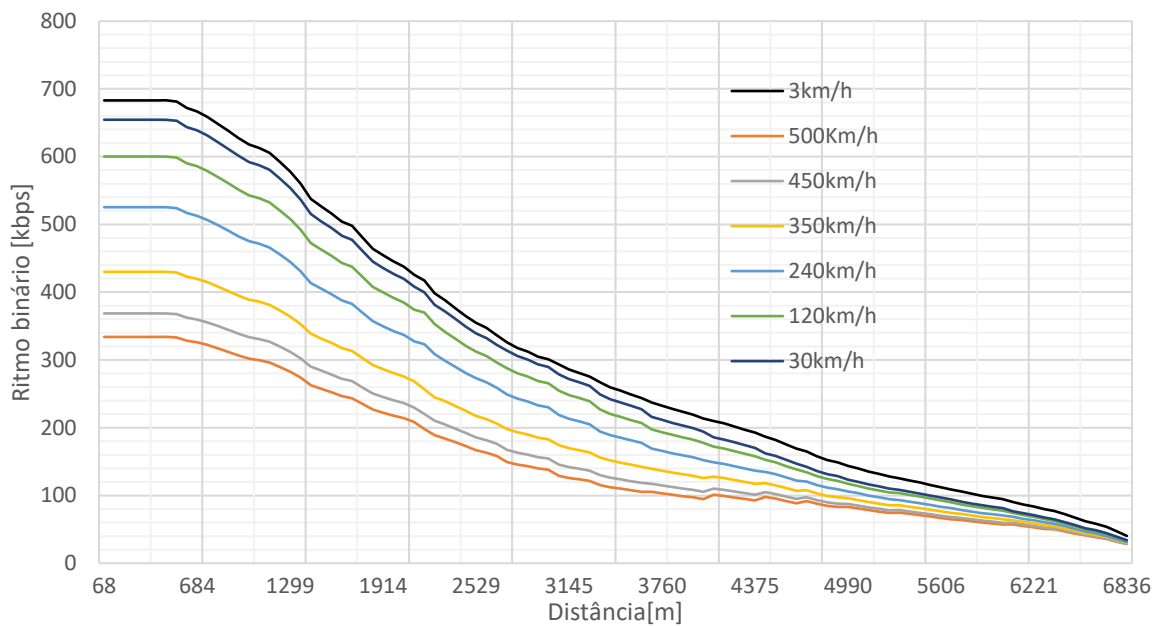


Figura 4.7 – Ritmo Binário em função da distância para a ligação descendente.

Deste estudo conclui-se que para mantermos ritmos de transmissão equivalentes ou superiores àqueles do GSM-R, o raio de célula não deve ultrapassar os 6 km. Isto para ambientes de propagação abertos, nos casos de ambientes menos favoráveis à propagação a distância máxima diminuirá consideravelmente.

Em determinadas circunstâncias pode ser necessário considerar implementar células com raios pequenos, mas com alta capacidade. Por exemplo em locais onde estejam presentes maior número de comboios.

Os estudos apresentados neste capítulo são casos estáticos onde se utiliza a menor largura de banda disponível à tecnologia LTE e com base apenas em simulações. No capítulo seguinte apresenta-se o estudo do comportamento do LTE-R em condições mais próximas de um ambiente real.

5. Caso de estudo

Tendo em conta os resultados obtidos anteriormente, pretende-se neste capítulo aplicar a metodologia de cálculo da capacidade do LTE-R em casos particulares, em que já se conhece um planeamento GSM-R. Assim, será possível determinar a diferença para esta tecnologia e avaliar o desempenho do LTE-R.

Como caso de estudo vai-se utilizar a linha da Beira Baixa, em que foram utilizados dados provenientes de medidas efetuadas na banda de 900 MHz com vista à implementação do sistema de GSM-R na linha. Usando esses dados, nomeadamente os relativos à atenuação em cada ponto da linha para cada uma das antenas emisoras, assim como os ganhos das respetivas antenas para cada um dos mesmos pontos, procede-se ao estudo do comportamento do LTE-R nas condições de propagação rádio que são oferecidas ao GSM-R. Os resultados deste estudo podem ser comparados ao desempenho do GSM-R assim como aos resultados obtidos por outros investigadores que recorreram a diferentes métodos de simulação, nomeadamente aos resultados apresentados em [18].

5.1. Caracterização da linha

Na Figura 5.1 está representado o mapa da linha da Beira Baixa, nele encontram-se assinaladas as localizações de todas as antenas planeadas para o GSM-R. Para cada uma dessas antenas, são 22 no total, possuímos uma lista das características de propagação entre a respetiva antena e cada um dos pontos da linha. As antenas estão, maioritariamente, distanciadas entre si de 3km a 4km em linha reta. A menor distância que as separa é de cerca de 1.5km, entre o ponto quilométrico (Pk) 195+778 e Benespera e a maior distancia é de 6km e está compreendida entre Benespera e o Pk 203+695. A linha está compreendida entre a Covilhã (Pk 165+180) e a Guarda (Pk 211+640) totalizando cerca de 46.5km.

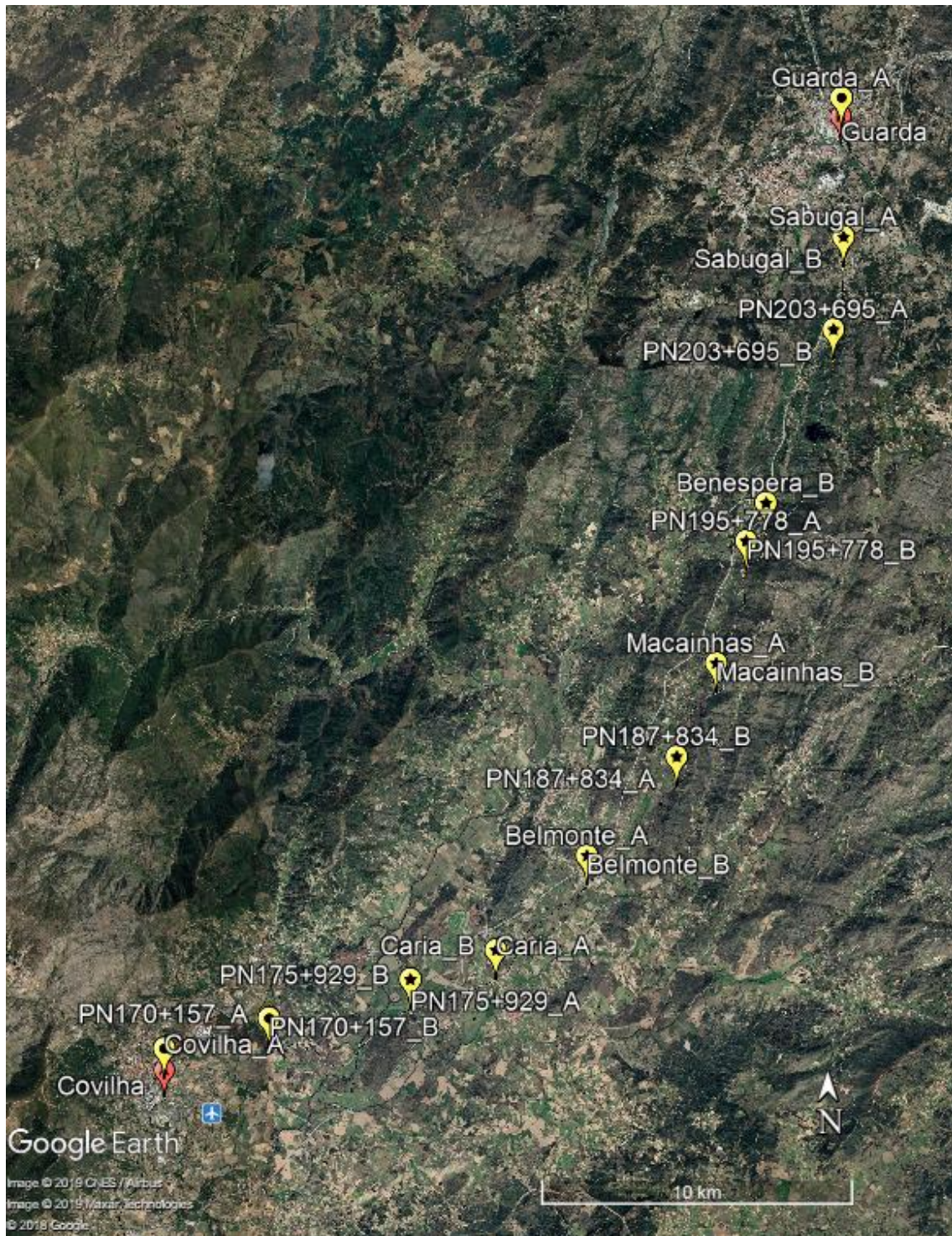


Figura 5.1 - Mapa da Linha da Beira Baixa.

5.2. Cálculo da capacidade

O objetivo final da análise dos dados é a obtenção do ritmo binário do sistema. Para tal vamos determinar o SINR em cada ponto da linha usando o método apresentado em [17]. Desta forma obtém-se o ritmo para um comboio que esteja parado na linha. Esses dados são então processados pelo método apresentado no ponto 4.1 obtendo-se os resultados para três velocidades habitualmente consideradas nos ambientes ferroviários 120km/h, 350km/h e 500km/h.

5.2.1. Cálculo da relação SINR

Para cada ponto da linha determina-se qual a potência recebida de cada uma das 22 antenas ativas ao longo da linha. A equação (5.1) descreve a forma como se pode determinar a potência recebida em cada ponto, (considera-se a existência de uma *Remote Radio Unit* (RRU)),

$$P_{rx[dB]} = P_{tx[dB]} + G_{a[dBi]} - L_{p[dB]} \quad (5.1)$$

em que,

P_{rx} – Potência recebida pelo UE;

P_{tx} – Potência emitida pelo eNodeB;

G_a – Ganho da antena do eNodeB;

L_p – Atenuação do Percurso.

Após se obter a potência recebida de cada antena, em cada ponto da linha, para determinar qual o *best server*, basta encontrar qual o emissor cujo sinal chega com maior potência em cada Pk. Será essa a potência considerada para a determinação do SINR em cada Pk.

O SINR é determinado por cada Pk, para tal usa-se o princípio modelado pela equação (5.2) onde a potência recebida do *best server* no ponto i (P_i) é dividida pelo somatório dos sinais recebidos de todas as outras antenas (P_j) somado à potência do ruído (P_{noise}).

$$\gamma_i = \frac{P_i}{P_{noise} + \sum_{j \neq i} P_j} \quad (5.2)$$

A forma de determinar SINR apresentada em cima descreve o pior caso, sem a aplicação de qualquer técnica de diminuição da interferência, exceto aquelas que já estão presentes no modelo usado para determinar os dados usados nos presentes cálculos.

Em [18] é apresentada uma forma de diminuição da interferência, que recorre a um esquema de reutilização de frequências conforme a Figura 5.2.

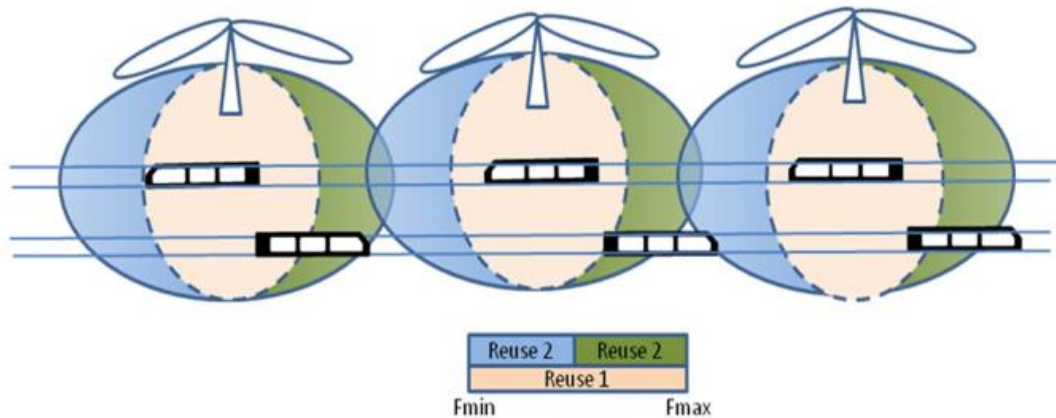


Figura 5.2 - Esquema de reutilização de frequências (Retirado de [18]).

No interior das células utiliza-se a totalidade dos RB, mas com uma potência de emissão inferior, mais próximo das fronteiras de célula, os recursos são divididos em dois blocos, usados em extremos opostos da célula e que alternam em células adjacentes. Desta forma diminui-se a interferência ao longo do percurso, o que pode levar a melhorias no desempenho do sistema.

5.2.2. Determinação do ritmo de transmissão

Com o SINR determinado para cada Pk, determina-se o ritmo binário por RB usando a metodologia apresentada em [17] e cuja fórmula simplificada foi apresentada na equação (4.1).

A determinação do ritmo binário por RB para outras velocidades de deslocação do UE é realizada recorrendo ao algoritmo apresentado no ponto 4.1, e usando o SNR, o SINR e

o R_{RB} de $v=3\text{km/h}$. Desta forma torna-se possível determinar o ritmo binário para as diferentes velocidades consideradas.

5.3. Apresentação dos resultados

Para a determinação dos seguintes resultados foi considerado que a potência emitida pelas antenas seria de 45.8dBm de acordo com [18], a largura de banda do sistema é de 1.4MHz o que disponibiliza 6 RB. A potência disponível é distribuída de forma idêntica por todos os RB.

5.3.1. Potência recebida

Os dados de ganho de antena, atenuação de percurso e potência emitida são processados como apresentado no ponto 5.2.1, como resultado obtêm-se os dados apresentados na Figura 5.3.

Verifica-se que as potências recebidas são consideravelmente elevadas e que não existem zonas com falta de cobertura. A zona onde a potência recebida é mais baixa fica junto ao Pk 201 sendo que o valor é superior aos -70dBm, tratando-se de um valor mesmo assim elevado.

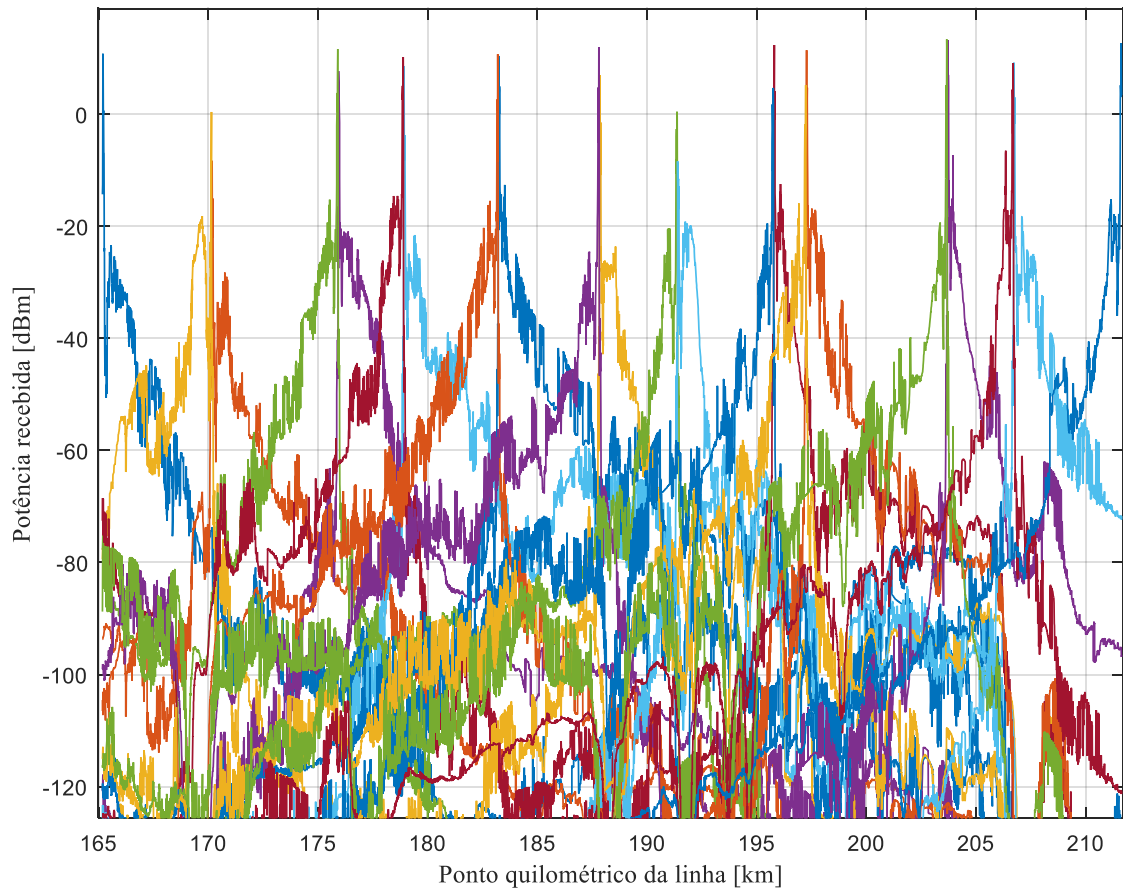


Figura 5.3 - Potência recebida ao longo da linha.

5.3.2. Best server

Na Figura 5.4 está representado um histograma que contém os resultados do *best server*, verifica-se que a distribuição não é uniforme, o que é espectável visto que ela pode variar com diversos fatores, nomeadamente a distância entre as antenas e o terreno. Se considerarmos as antenas 14 e 17, que tem a menor quantidade de Pk's dos quais são *best server*, verificamos que correspondem ao troço de linha onde as antenas estão mais próximas entre si, o troço entre o Pk 195+778 e a Benespera.

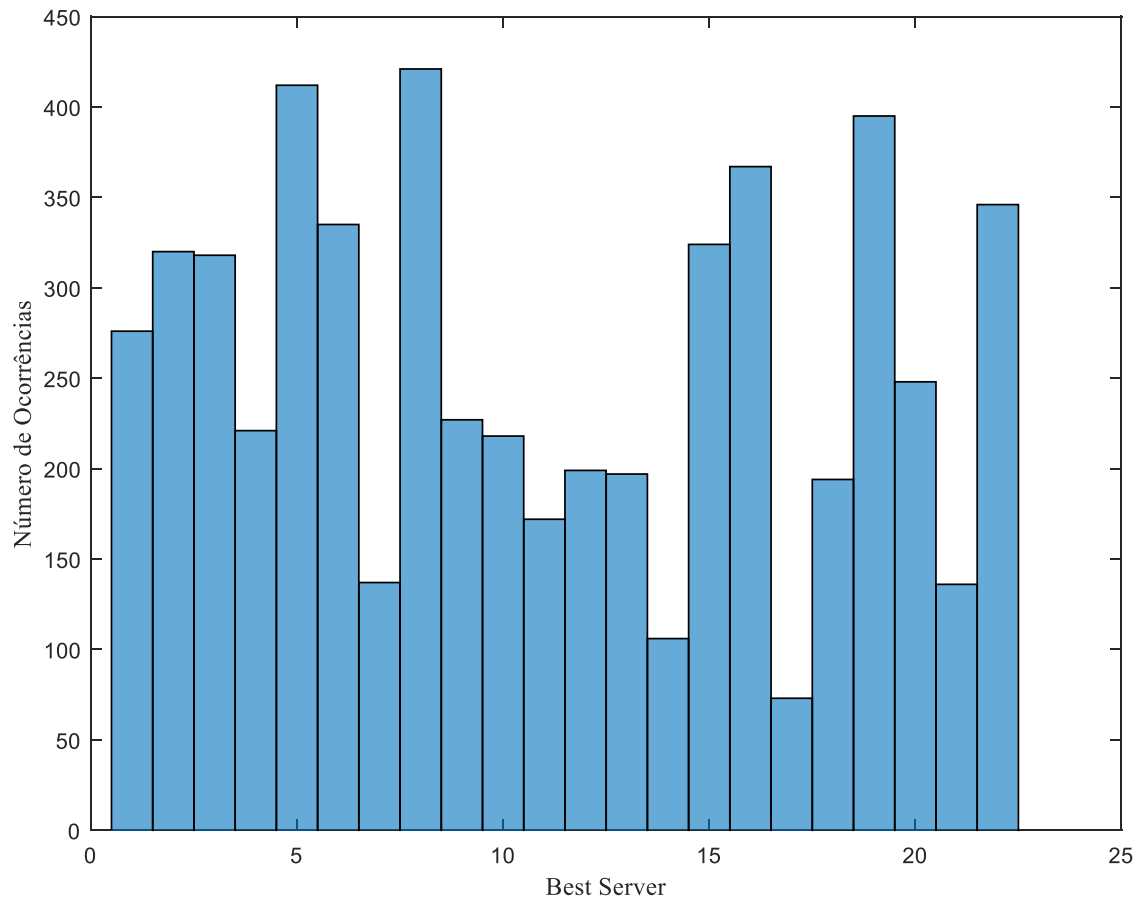


Figura 5.4 – Histograma do best server.

A potência recebida do *best server* ao longo da linha, corresponde aos máximos da potência recebida em cada ponto. Na Figura 5.5 apresenta-se o gráfico onde está desenhada a curva que representa a potência do *best server* ao longo da linha. Procedendo-se à comparação com o gráfico da Figura 5.3 as semelhanças são claras. As menores

potências recebidas dos *bests servers* rondam os -68dBm e situam-se, sem surpresas, nos troços mais longos da linha. Estes valores são, apesar de tudo, excelentes.

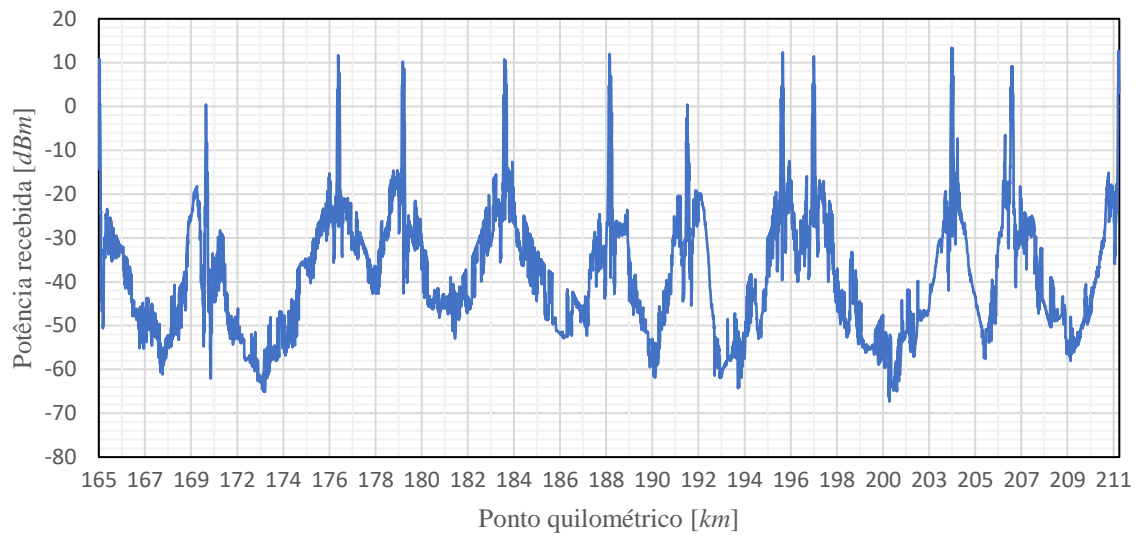


Figura 5.5 - Potência recebida do Best Server.

5.3.3. Resultados do SINR

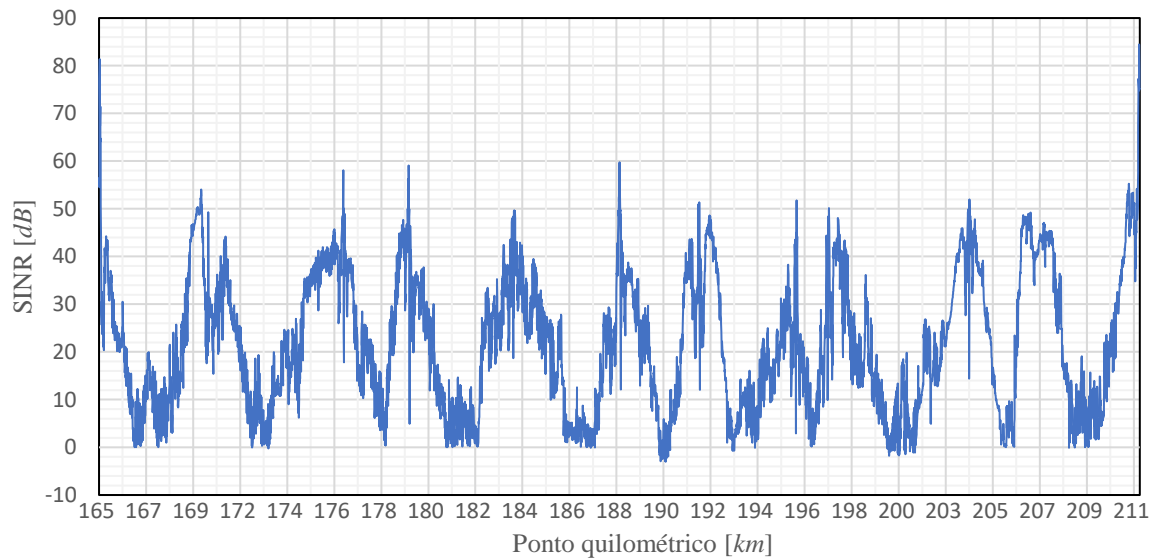


Figura 5.6 – SINR.

Os valores do SINR são obtidos recorrendo ao método indicado no ponto 5.2.1 e os resultados encontram-se representados no gráfico da Figura 5.6. Os pontos com pior SINR encontram-se nas zonas de Pk 190 e Pk 200. Os motivos que levam a que isto aconteça parecem distintos. No caso do Pk 190 é o nível de interferência está a causar o

abaixamento do SINR. Já no caso do Pk 200, o valor mais baixo do SINR deve-se ao sinal recebido ser também ele mais baixo que no resto da linha.

Avaliando a sobreposição das curvas da potência do *best server* com o SINR, que está representada do gráfico da Figura 5.7, e o gráfico de todos os sinais recebidos com o SINR representado na Figura 5.8, verificamos que existe espaço para melhoria na questão da interferência. Sendo que uma das soluções seria usar o método de reutilização de frequências já referido no ponto 5.2.1.

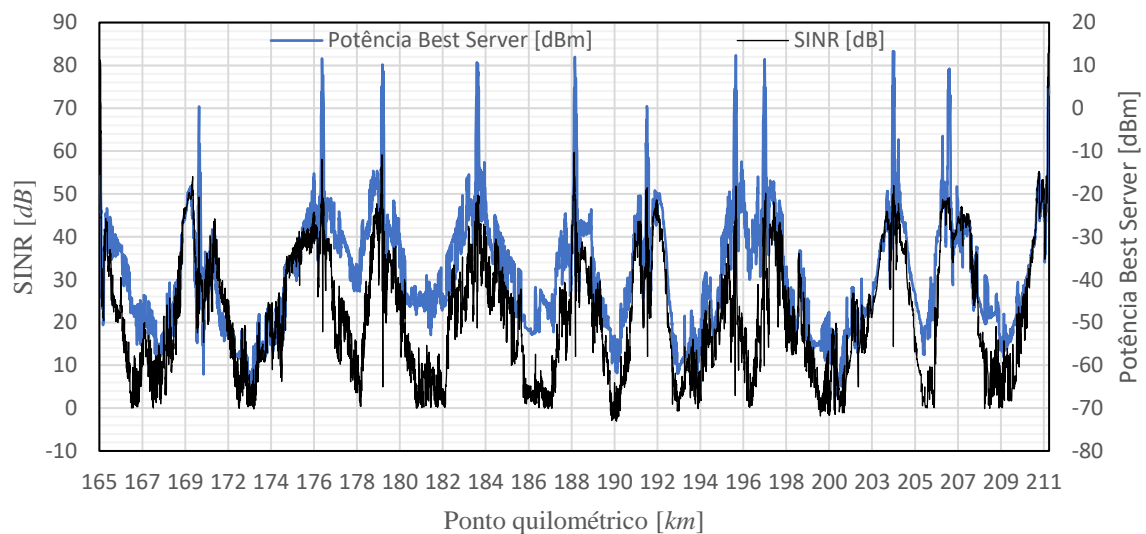


Figura 5.7 - Gráfico da potência do Best Server e do SINR.

Apesar de entendermos existir espaço para melhorias no SINR, também se verifica que os valores obtidos são melhores do que aqueles que foram determinados no *linkbudget*. Assim, espera-se que os resultados obtidos no ritmo binário, também eles, sejam mais favoráveis do que aqueles que foram determinados nos cálculos realizados no ponto 4.3.

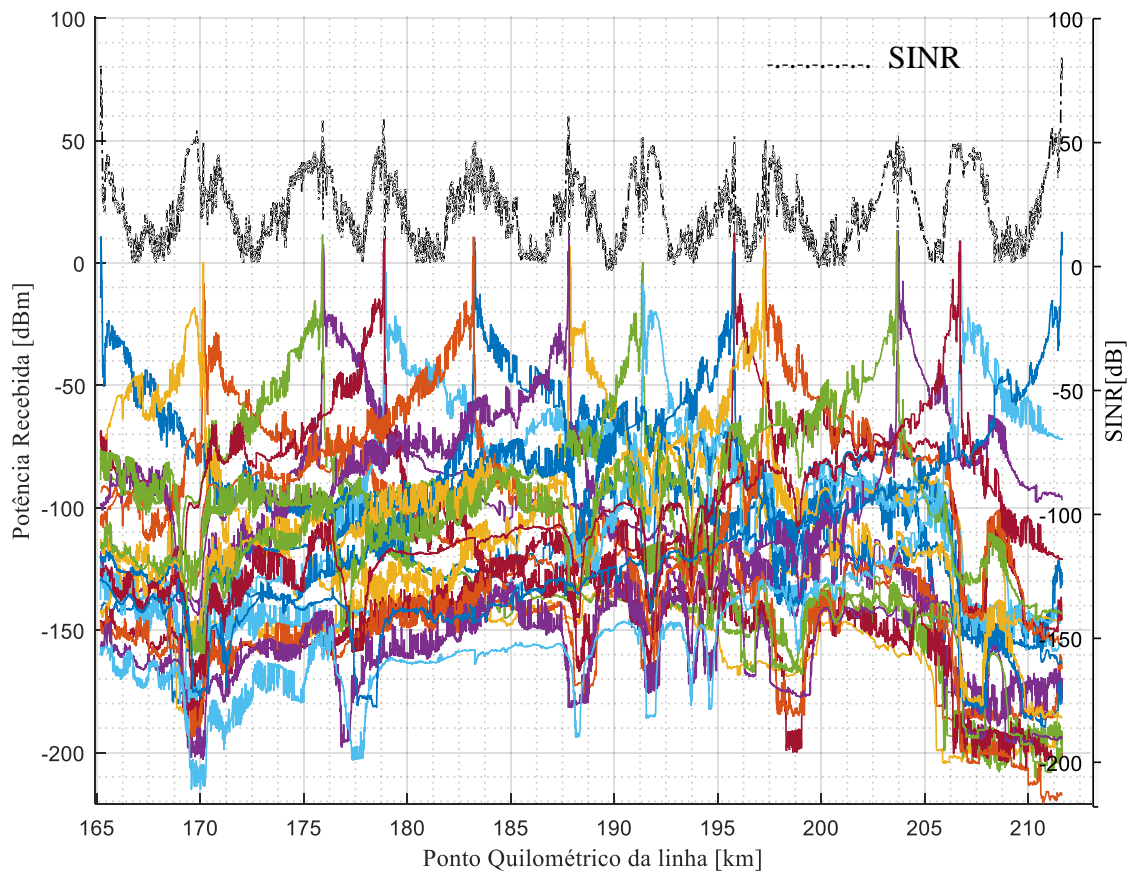


Figura 5.8 - Gráfico da potência recebida de todas as antenas e curva do SINR.

5.3.4. Ritmo binário

Recorrendo aos métodos já referidos, foram determinados os ritmos binários por RB para as velocidades de 3km/h, 120km/h, 350 km/h e 500km/h. No gráfico da Figura 5.9 apresentam-se os resultados obtidos para os 3 e os 120km/h. Para a menor velocidade de deslocação do comboio obtém-se um ritmo binário de pico a rondar os 1.28Mbps por RB, o que corresponde a cerca de 7.68 Mbps considerando todos os RB disponíveis. Nos pontos onde o SINR é menos favorável os ritmos binários por RB não ultrapassam 100kbps o que corresponde a cerca de 0.6Mbps.

No caso de a velocidade corresponder a 120km/h nos casos menos desfavoráveis os resultados são idênticos aos anteriores. Por outro lado, quando o SINR tem os valores mais elevados existe efetivamente uma quebra do ritmo binário quando comparado com o caso da velocidade mais baixa, esta quebra ronda os 150kbps por RB.

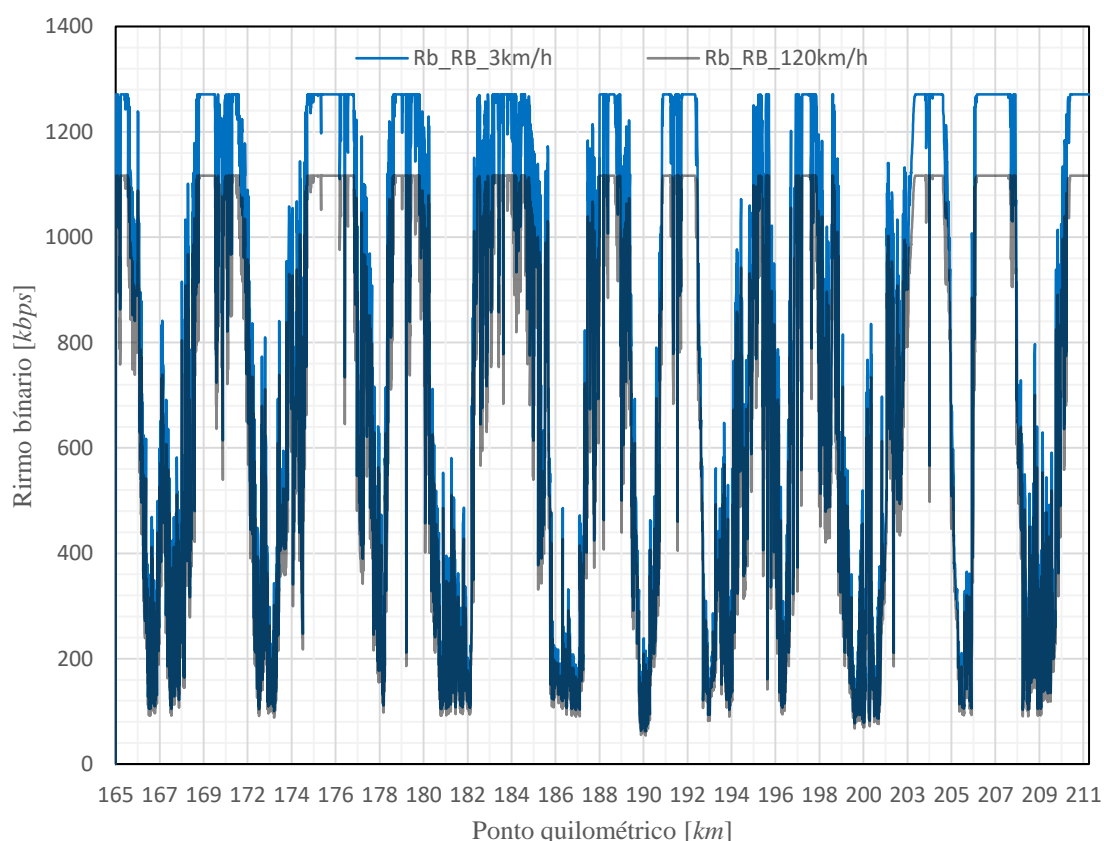


Figura 5.9 – Ritmo binário por RB para $v=3\text{km/h}$ e $v=120\text{km/h}$.

Os resultados obtidos para as velocidades de 350km/h e 500km/h estão representados no gráfico da Figura 5.10. Também nestes casos, para os pontos de SINR mais baixo a

velocidade de deslocamento do equipamento móvel não causou repercussões significativas no ritmo binário. Por outro lado, nos pontos onde o SINR é mais favorável, o aumento da velocidade causa degradações substanciais no ritmo, onde para os 500km/h o mesmo não ultrapassa os 640kbps por RB e a 350km/h atinge os 800kbps.

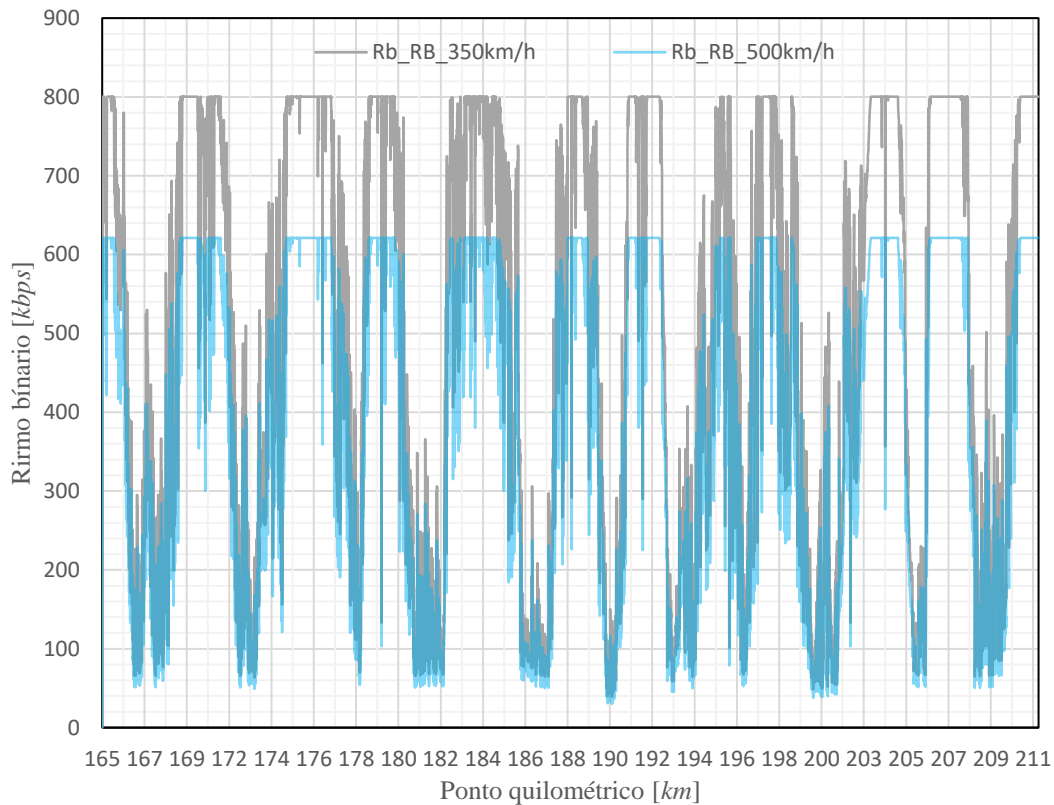


Figura 5.10– Ritmo binário por RB para $v=250\text{km/h}$ e $v=500\text{km/h}$.

Os resultados obtidos estão dentro do esperado sendo, no entanto, superiores àqueles que os cálculos realizados anteriormente sugeriam. Mesmo para uma velocidade de 500km/h os menores valores obtidos estão nos 40kbps por RB, estes valores ocorrem nos pontos já identificados com os menores valores de SINR. No extremo oposto, que ocorre para quando o comboio está estático, ou muito próximo disso e o SINR tem valores superiores, os valores do ritmo binário rondam os 1.28Mbps por RB.

Para se observar de forma mais pormenorizada o comportamento no espaço compreendido entre duas antenas, foi criado um gráfico de pormenor que se apresenta na Figura 5.11 e que representa o ritmo binário obtido (considerando a totalidade de RB disponíveis) para velocidades de 350km/h e 500km/h, no troço compreendido entre o Pk 187+834 e Maçainhas.

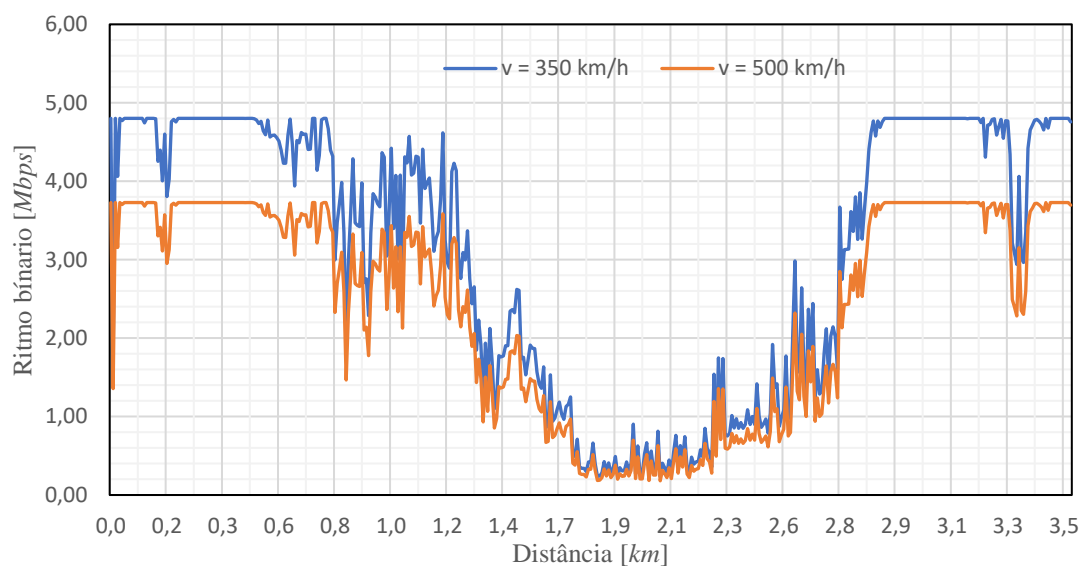


Figura 5.11 - Ritmo binário total em função da distância, no troço Pk187+834 – Maçainhas.

Verifica-se que a distância entre as duas antenas é de 3.5 km, e que os piores resultados do ritmo binário se localizam na zona mais afastada das duas antenas a cerca de 1.9km da antena do Pk 187+834. Os melhores resultados encontram-se, como espectável, nas zonas próximas das antenas e ao longo de cerca de 600m, o que está de acordo com os resultados obtidos no capítulo anterior. As curvas obtidas não se traduzem numa linha suave, mas sim numa linha que claramente está condicionada pelas condições de propagação naquele troço.

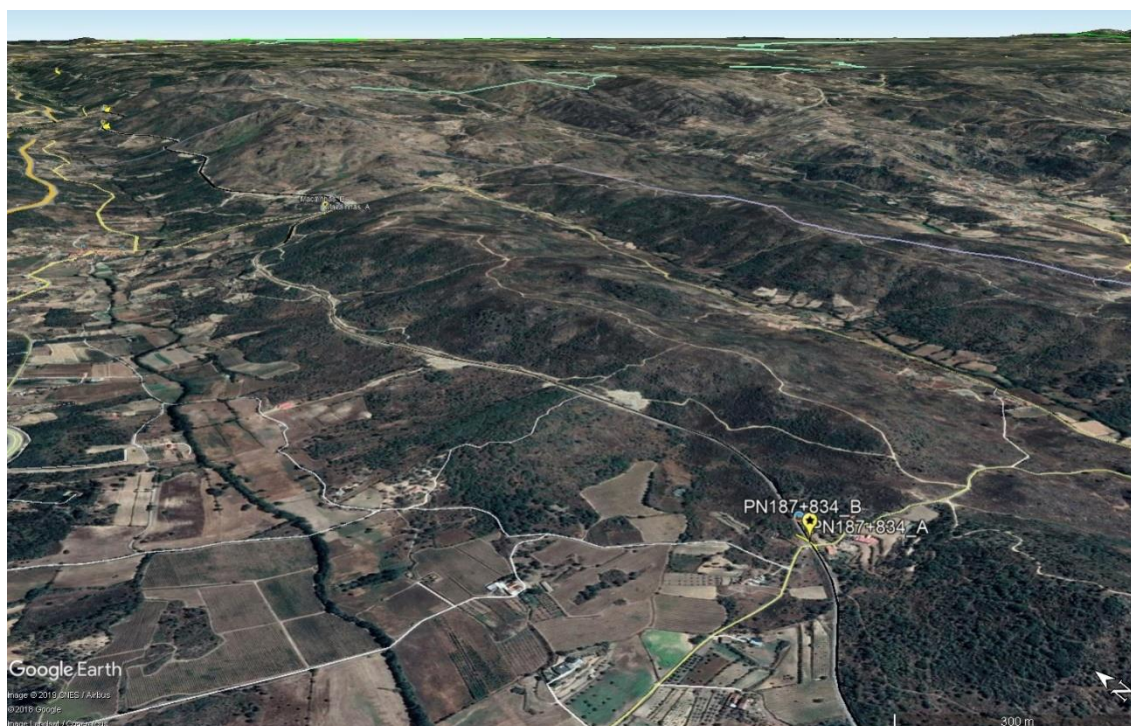


Figura 5.12 – Troço entre Pk 187+834 e Maçainhas.

Representado na Figura 5.12 encontra-se o mapa de terreno do trecho em causa, a geometria do terreno explica o comportamento das curvas apresentadas no gráfico da Figura 5.11, onde o trecho compreendido entre os quilómetros 0.6 e 1.2 beneficia de um ritmo binário um pouco mais favorável do que o que seria espectável, que se justifica pelo facto de a antena de Maçainhas não estar em linha de vista com essa zona em particular, melhorando o SINR e consequentemente o ritmo obtido.

5.3.5. Otimização da sectorização

Para se proceder à análise do comportamento do sistema para distâncias entre eNodeB superiores àquelas do caso em estudo, escolheram-se dois trechos consecutivos e removeram-se as antenas entre os dois trechos. Para este efeito foram escolhidos os trechos que podem ser observados na Figura 5.13 e que correspondem a Caria – Belmonte e Belmonte - PN187+834. Assim, procedeu-se a uma análise dos dados, idêntica à anterior, apenas retirando os elementos referentes às antenas de Belmonte.

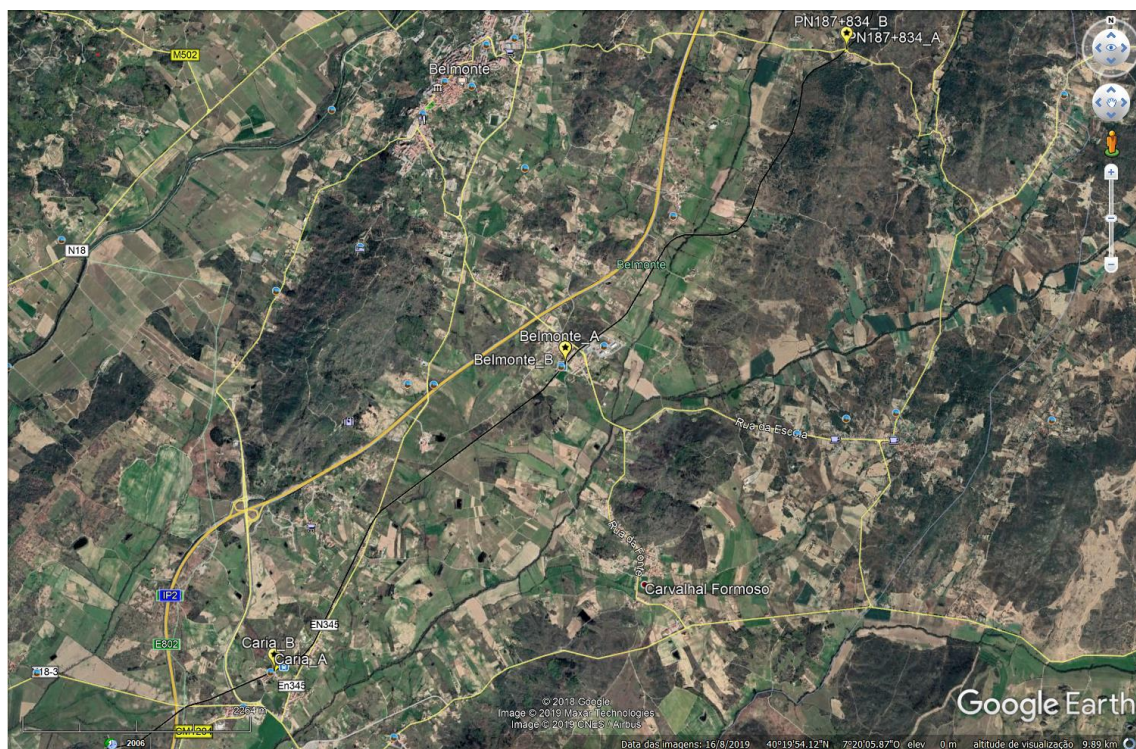


Figura 5.13 - Trechos de Caria - Belmonte e Belmonte - PN187+834.

Na Figura 5.14 observa-se os resultados da potência recebida ao longo da linha sem as contribuições das antenas de Belmonte. Em consequência, entre os pontos quilométricos

178 e 188 não temos qualquer eNodeB, o que leva a uma consequente diminuição da potência recebida na zona central deste troço e que atinge valores a rondar os -65dBm.

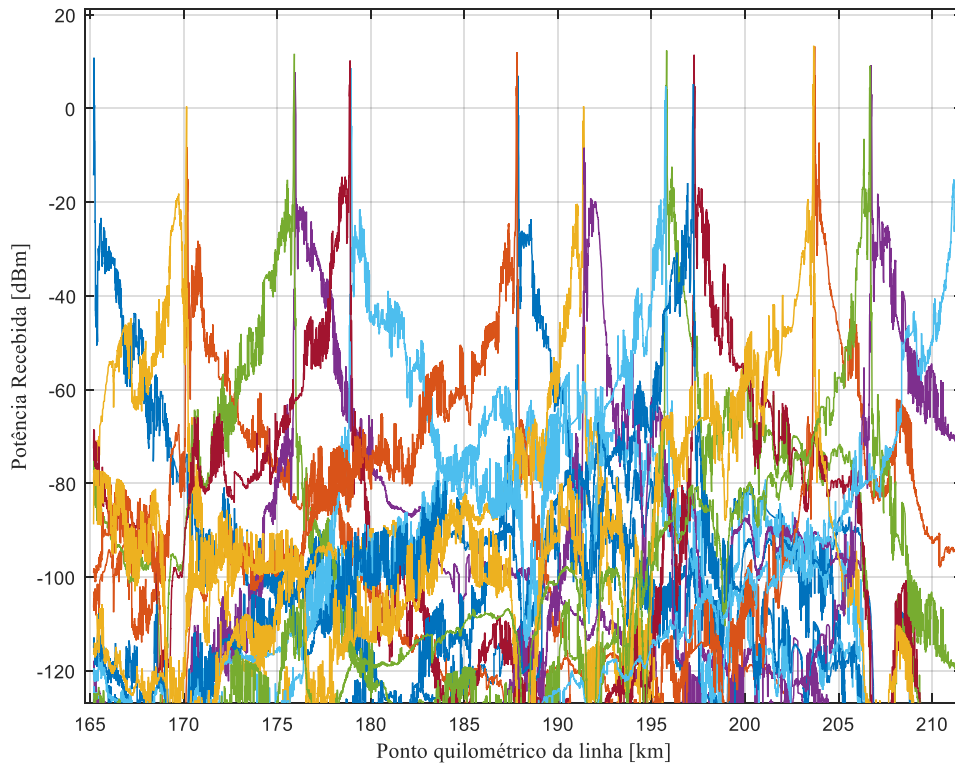


Figura 5.14 - Potência recebida sem o eNodeB de Belmonte

A ausência das antenas de Belmonte traduz-se numa diminuição do valor da potência recebida naquele troço e igualmente da diminuição da interferência. A combinação destes fatores traduz-se num SINR com valores que podemos observar na Figura 5.15.

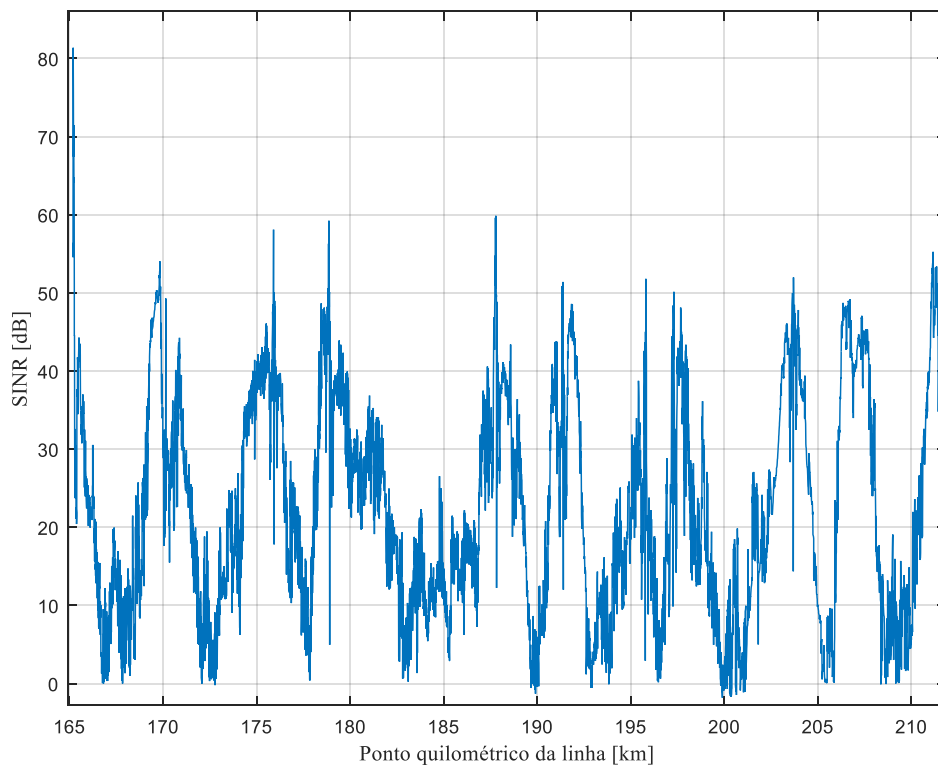


Figura 5.15 - SINR sem o eNodeB de Belmonte.

Como se observa, no trecho em causa, existe uma alteração significativa do SINR, com uma diminuição clara dos valores obtidos. No entanto, dada a relação entre potência recebida e a interferência, os resultados no SINR são suficientes para se obter um valor de débito binário ainda aceitável, tal como se verifica na Figura 5.16, que representa o ritmo binário por RB no trecho entre Caria e PN187+834.

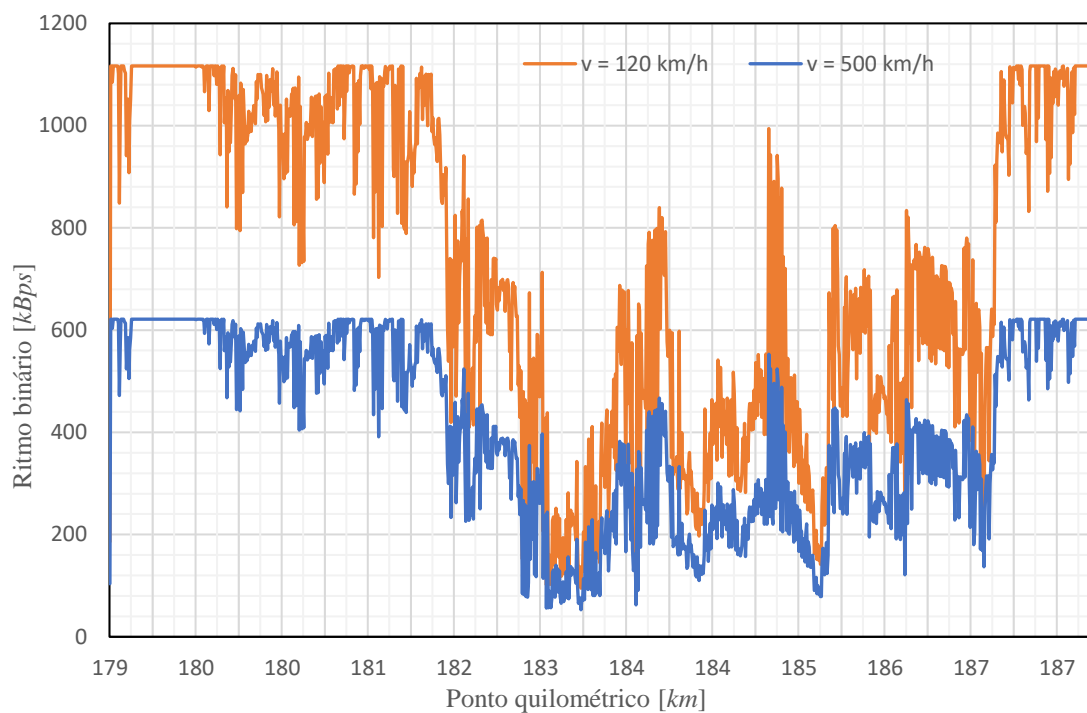


Figura 5.16 - Ritmo binário por RB sem o eNodeB de Belmonte.

Na Figura 5.16 verificamos o comportamento do ritmo binário por RB no trecho entre Caria e PN187+834 para as velocidades de 120 km/h e 500 km/h. Os resultados obtidos são bons. Para uma velocidade de 500 km/h o débito binário mínimo é de 52 kbps, provando que a utilização dos locais de implementação das estações base de GSM-R poderia ser reutilizado numa eventual modernização para o LTE-R.

6. Conclusões

Este trabalho dedicou-se ao estudo dos sistemas de telecomunicações móveis ferroviários com o objetivo de analisar a possibilidade de usar a tecnologia LTE nas ferrovias. A componente de foco do estudo foi a interface rádio do sistema ao nível da cobertura e capacidade. No entanto foi necessário investigar vários tópicos fundamentais às comunicações móveis ferroviárias, para se perceber as necessidades que era necessário suprir e os requisitos que seriam obrigatórios garantir.

O trabalho iniciou-se pela abordagem às questões relacionadas com as comunicações móveis ferroviárias, aos seus requisitos específicos e à tecnologia que atualmente é utilizada, o GSM-R. O GSM-R trouxe uniformização às comunicações móveis ferroviárias na Europa. É usado para transmitir sinalização ETCS de nível dois e três e garante todos os requisitos funcionais existentes nas normativas europeias do sector. No que diz respeito às normativas elas preveem uma probabilidade de cobertura de 95% em cada troço de 100m sendo que, os níveis de sinal exigidos dependem do nível de ETCS em que se está a trabalhar, mas para os níveis dois e três o sinal mínimo é de -95dBm. O correto funcionamento destes sistemas deve ser garantido mesmo para comboios a deslocarem-se até velocidades de 500km/h. No que diz respeito a espectro, ao GSM-R foi atribuída uma gama entre os 875MHz e os 960MHz o que dá um total de 19 canais tanto para *uplink* como para *downlink*. Apesar de se reconhecerem muitas qualidades no GSM-R, algumas limitações também foram observadas. As três maiores limitações, encontram-se na baixa eficiência na utilização de recursos, na falta de capacidade e a baixa capacidade para suporte de serviços de dados.

A tecnologia LTE foi também estudada e as suas características apresentadas. As componentes relativas à cobertura e capacidade foram alvo de maior atenção e sujeitas a estudos e simulações que relevaram dados indicadores da sua perfeita aplicabilidade aos caminhos de ferro. No estudo preliminar conclui-se que o LTE-R consegue garantir ritmos binários superiores ao GSM-R mesmo para raios de célula muito superiores aos praticados no GSM-R.

O estudo de um caso prático veio cimentar as conclusões já obtidas nos pontos anteriores do trabalho e permitiu tirar as conclusões finais.

6.1. Conclusões finais

O estudo realizado neste trabalho permitiu concluir que o LTE-R é uma tecnologia que apresenta características ideais para a utilização nas vias ferroviárias. O seu funcionamento baseado em pacotes IP adequa-se às características exigidas pelas comunicações ferroviárias levando a que seja possível otimizar a utilização dos recursos. As diversas modulações utilizadas em combinação com os diferentes códigos e larguras de banda possíveis faz com que seja uma tecnologia muito versátil e que permite uma adaptação excelente às inúmeras condições que se encontram nos ambientes ferroviários. A possibilidade de utilizar técnicas como o MIMO e sistemas de controlo de interferência, tornam esta tecnologia capaz de explorar de forma muito eficaz e eficiente os recursos que lhe são disponibilizados. Todas estas características levam a que o LTE-R se mostre como um grande concorrente a ser o substituto do GSM-R.

Na componente teórica deste estudo estabeleceram-se metas mínimas que o LTE-R deveria atingir para o considerarmos efetivamente como uma solução para as comunicações móveis em linha férrea. No final desse estudo verificou-se que, recorrendo apenas à menor largura de banda disponível no LTE-R e numa gama de frequências já atualmente dedicada exclusivamente às ferrovias, o LTE-R consegue atingir bons resultados. Tendo-se obtido resultados válidos nesta componente, passou-se à componente prática. Recorrendo a dados reais de planeamento de GSM-R verificou-se qual o comportamento do LTE-R nessas condições. Os resultados obtidos revelaram que o LTE-R supera as expectativas, obtendo excelentes resultados tanto de cobertura como de capacidade. Numa célula com um raio superior a 2 km, o LTE-R consegue atingir débitos binários na ordem 3.7Mbps, isto a uma velocidade de 500km/h e utilizando apenas 1.4MHz de largura de banda. Em casos em que o raio de célula ultrapassa os 6km os resultados continuam a ser excelentes, atingindo no pior caso os 312kbps a uma velocidade de 500km/h. Estes resultados ultrapassam aqueles alcançados pelo GSM-R. Recorrendo a técnicas de atenuação da interferência seria ainda possível atingir resultados mais favoráveis.

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que o LTE-R é uma tecnologia perfeitamente capaz de substituir o GSM-R, trazendo consigo muitos benefícios para as comunicações móveis ferroviárias. Estes resultados são coerentes com outros estudos já

realizados que recorreram a simulações de cenários comparáveis utilizando métodos distintos dos aqui usados.

Acredita-se que o recorrer a dados reais, usados para o dimensionamento do GSM-R, é a melhor alternativa para estudo da componente rádio destes sistemas. Assim não fica margem de dúvida quanto à capacidade do LTE-R conseguir usar as mesmas infraestruturas do GSM-R para ser implementado. Este facto leva a que uma potencial substituição do GSM-R pelo LTE-R seja muito mais comportável do que se novas infraestruturas tivessem de ser planeadas e executadas.

6.2. Trabalho futuro

Em sequência ao trabalho apresentado neste documento existem alguns temas que constituem bons tópicos para trabalhos futuros. Os mais relevantes são o estudo do impacto da utilização de frequências mais elevadas nas comunicações ferroviárias, nomeadamente na gama dos 2.6GHz e outras gamas de frequência das quais já se fala no âmbito do FRTMS. Uma outra opção ao GSM-R é o 5G, trata-se de uma tecnologia que está agora em início de implementação, mas o estudo da sua utilização nas ferrovias e a sua comparação com o LTE-R é muito pertinente.

Bibliografia

- [1] A. Sniady e J. Soler, “Evaluation of ETCS performance with LTE as alternative railway communication network using OPNET,” Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- [2] A. Sniady e J. Soler, “Performance of LTE in High Speed Railway Scenarios,” em *Communication Technologies for Vehicles*, France, 2013.
- [3] R. He, B. Ai, G. Wang, K. Guan, Z. Zhong, A. F. Molisch, C. B. Rodriguez e C. Oestges, *High-Speed Railway Communications*, IEEE, 2016.
- [4] a. Sniady e J. Soler, “LTE for Railways Impact on Performance of ETCS Railway Signaling,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, pp. 69-75, 06 2014.
- [5] ISEL - DEETC, “Metodologia para Planeamento Rádio em GSM-R,” Refer Telecom, Lisboa, 2009.
- [6] N. Cota, A. Serrador, P. Veira, J. P. Neves e A. Rodrigues, “An Enhanced Radio Network Planning Methodology,” ISEL, Refer Telecom, IST, Lisboa, Portugal.
- [7] UIC, Outubro e Novembro 2017. [Online]. Available: <http://uic.org/gsm-r>.
- [8] GSM-R Functional Group, “EIRENE - Functional Requirements Specification Version 8.0.0,” UIC, Paris, 2015.
- [9] J. Calle-Sánchez, M. Molina-García, J. I. Alonso e A. Fernández-Durán, “Long Term Evolution in High Speed Railway Environments: Feasibility and Challenges,” em *Bell Labs Technical Journal* 18, 2013.
- [10] I. F. Akyildiz, D. M. Gutierrez-Estevez e E. C. Reyes, “The evolution to 4G cellular systems: LTE-Advanced,” *Physical Communication*, vol. 3, pp. 217-244, 2010.
- [11] C. Gessner, A. Roessler e M. Kottkamp, *UMTS Long Term Evolution (LTE) - Technology Introduction*, Munique: Rohde&Schwarz, 2012.

- [12] S. Sesia, I. Toufik e M. Baker, LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice, Second Edition, Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [13] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld e P. Beming, 3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband, Oxford, UK: Elsevier, 2007.
- [14] N. Cota, *Materiais da Unidade Curricular de Redes de Comunicações Móveis*, Lisboa: ISEL - DEETC, Segundo Semestre 2015/2016.
- [15] H. Holma e A. Toskala, LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access, John Wiley & Sons, Ltd. , 2009.
- [16] J. Robson, The LTE/SAE Trial Initiative: Taking LTE/SAE from Specification to Rollout, IEEE, 2009.
- [17] Ericsson, Coverage and Capacity Dimensioning RECOMMENDATION, Ericsson, 2009.
- [18] ETSI, “ETSI TR 103 554 V1.1.1 (2018-08) - Rail Telecommunications (RT); Next Generation Communication System; LTE radio performance simulations and evaluations in rail environment,” ETSI, Sophia Antipolis - FRANCE, 2018.
- [19] Samsung, “SAMSUNG NEWSROOM,” Samsung, 21 12 2017. [Online]. Available: <https://news.samsung.com/global/worlds-first-lte-railway-service-on-high-speed-train-goes-live-in-korea-supplied-by-samsung-and-kt>. [Acedido em 29 09 2019].
- [20] Y.-S. Song, J. Kim, S. W. Choi e K. Yong-Kyu, “Long Term Evolution for Wireless Railway Communications: Testbed Deployment and Performance Evaluation,” *IEEE Communications Magazine*, pp. 138-145, 02 2016.

