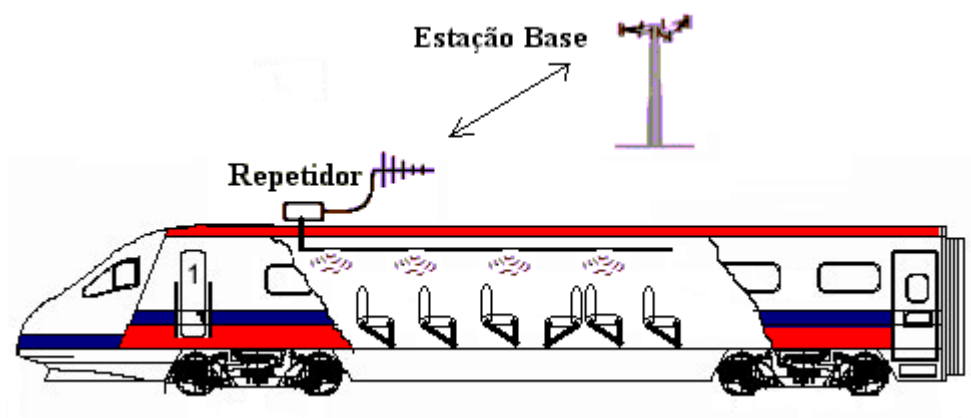


Universidade Técnica de Lisboa

Instituto Superior Técnico

Dimensionamento Óptimo de Estações Repetidoras em GSM para Comboios



Hugo Miguel Pinheiro Rebordão n°39844

Rui Pedro Sabóias Espadinha n°42339

Licenciatura em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Trabalho Final de Curso 027/2000

Lisboa, 11 de Julho de 2001

Trabalho realizado sob a orientação do
Professor Luís M. Correia

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de prestar o nosso agradecimento a algumas pessoas que nos ajudaram durante a realização deste trabalho final de curso. A todas elas estamos muito gratos pela sua colaboração prestada.

Agradecemos, em primeiro lugar, ao Professor Luís Correia pelo seu apoio e motivação dada ao longo destes meses, assim como pela disponibilidade que sempre demonstrou. Um muito obrigado pelos conselhos dados nas reuniões semanais.

Agradecemos também à operadora de comunicações móveis Telecel/Vodafone, e em especial aos Engs. Pedro Rocha, Miguel Gama e Nuno Magalhães, sem os quais não teria sido possível realizar as medidas de sinal.

Por último queremos agradecer a todos os colegas e amigos que de uma forma directa ou indirecta nos ajudaram a efectuar este trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como objectivo estudar os repetidores em GSM, bem como determinar as condições que possibilitam a sua aplicação em comboios, de modo a que aumente a qualidade do sinal no interior das carruagens, ao longo de uma linha ferroviária.

Para esse efeito, neste relatório é apresentado um estudo geral da parte rádio do sistema GSM, assim como dos repetidores, indicando-se as suas principais características e limitações. São também descritos alguns modelos de propagação para interiores e exteriores. É ainda apresentado um estudo sobre perdas de penetração em veículos automóveis.

Posteriormente, descreve-se em pormenor o equipamento existente para a aplicação em causa. Este equipamento inclui três tipos de repetidores, antenas para o exterior da carruagem (por exemplo, dipolo) e antenas para o interior (por exemplo, cabos radiantes).

Apresenta-se também um conjunto de resultados de medidas efectuadas sobre perdas de penetração nas carruagens em dois tipos de comboios. Para o comboio Alfa Pendular chega-se a valores de perdas de 20 dB. Para o Comboio Inter Cidades obteve-se perdas de 10 dB.

De seguida analisou-se a questão da mobilidade dos repetidores, dando ênfase aos factores limitativos do repetidor como saturação, sensibilidade, introdução e amplificação de ruído e a possibilidade de existir interferência devido ao atraso introduzido pelo repetidor.

Efectuou-se também um estudo da influência que o repetidor pode exercer para com os terminais móveis no exterior da carruagem. Verifica-se que, na pior das situações, é possível efectuar a ligação para a estação base através do repetidor, com o terminal a 50 m da carruagem.

Estimou-se através dos modelos de propagação qual o benefício da distância, entre a EB e o TM, que se ganha quando é usado o repetidor na ligação. Esse valor é no mínimo de 10 km.

Escolheu-se qual deve ser o ganho óptimo do repetidor que melhor se enquadra nesta aplicação, e chegou-se à conclusão que esse valor deverá ser tal que deve compensar a atenuação da antena interior na carruagem, o cabo radiante.

Foram efectuadas estimativas de potências emissão das estações de base, da operadora Telecel/Vodafone, já existentes ao longo da linha ferroviária Lisboa-Porto. Esta estimativa foi feita para perceber se, com as EBs existentes, é possível ao longo da linha ter um bom nível de cobertura de sinal. Foi também feita uma campanha de medidas para se obter os níveis de potência de sinal recebida ao longo da Linha do Norte. Posteriormente, foi feita uma comparação entre os valores estimados e medidos. Verifica-se pelas estimativas e medidas efectuadas que é necessário em certas zonas introduzir novas estações de base ou repetidores fixos para melhorar a cobertura. Por outro lado, existem zonas onde a potência de sinal é tão elevada que leva o repetidor à saturação. Para solucionar este problema sugere-se a reorientação de sectores e diminuição da potência de emissão das estações de base.

PALAVRAS CHAVE

Comunicações Móveis
GSM
Repetidores
Ambientes interiores
Comboios

ÍNDICE

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
Lista de Siglas	xii
Lista de Símbolos.....	xiii
1.Introdução.....	1
2.Aspectos Teóricos	3
2.1 O Sistema GSM.....	3
2.1.1 Estrutura das redes GSM.....	3
2.1.2 Bandas de Frequências e Acesso Múltiplo.....	4
2.1.3 Níveis de Potências	6
2.2 Repetidores.....	10
2.3 Modelos de propagação.....	13
Dimensionamento	17
3.1 Equipamento Disponível	17
3.2 Medidas para a caracterização dos Comboios.....	18
3.2.1 Descrição dos ambientes e dos processos de medida.....	18
3.2.2 Análise das medidas	20
3.3 Ruído	24
3.4 Atenuação por Propagação.....	25
3.5 Distâncias Máxima e Mínima	25
3.5.1 Percurso Descendente	26
3.5.2 Percurso Ascendente	30
3.5.3 Influência do Ajuste de Ganho e do Controlo de Potência	32
3.6 Equilíbrio das Ligações.....	34
3.7 Influência no exterior das Carruagens.....	35
3.8 Benefícios da Aplicação.....	37
3.9 Ganho Óptimo	39
Análise da Linha de Comboio	41
4.1 Estimativa dos Níveis de Potência	41
4.2 Medidas ao longo da linha	44
4.3 Análise e Comparação dos valores estimados e medidos	46
4.4 Crítica à Solução da CP.....	47

- Anexo A - Canais Lógicos
- Anexo B - Tramas do GSM
- Anexo C - Temperatura de Ruído Externo
- Anexo D - Realimentação e Isolamento
- Anexo E - Classes de Repetidores
- Anexo F - Cadeia de Ruído
- Anexo G - Expressões dos Modelos de Propagação
- Anexo H - Modelos de interiores e VPL
- Anexo I - Características das carruagens e Locomotivas
- Anexo J - Localização dos Locais de Teste e orientação das antenas das EBs
- Anexo K - Perdas por penetração nas carruagens do alfa pendular e inter cidades
- Anexo L - Perdas por penetração nas cabines do alfa pendular do inter cidades
- Anexo M - Testes com o cabo radiante do Alfa Pendular
- Anexo N - Representação gráfica dos modelos de propagação
- Anexo O - Controlo de potência
- Anexo P - Zonas críticas de interferência
- Anexo Q - Cartas topográficas
- Anexo R - Atenuação de obstáculo e de propagação
- Anexo S - Estimativa dos EIRPs das EBs e do REP
- Anexo T - Medidas ao longo da linha ferroviária Lisboa-Porto
- Anexo U - Resolução de um problema de cobertura na linha

Referências Bibliográficas

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1** - Arquitectura da rede GSM
- Figura 2.2** - Arquitectura da rede GPRS
- Figura 2.3** - Espectro de frequências de trabalho do GSM
- Figura 2.4** - Portadoras no extremo da banda do GSM
- Figura 2.5** - Balanceamento de potências nos canais ascendente e descendente
- Figura 3.1** - Aplicação no canal descendente
- Figura 3.2** - Aplicação no canal ascendente
- Figura 3.3** - Equilíbrio das Ligações
- Figura 3.4** - Radiação para o exterior
- Figura 3.5** - Cenário da aplicação com e sem repetidor

LISTA DE TABELAS

- Tabela 2.1** - Classes de potência dos TMs
- Tabela 2.2** - Classes de potência das EBs
- Tabela 2.3** - Classes de potência das EBs Micro
- Tabela 2.4** - Níveis de sensibilidade
- Tabela 2.5** - Ruído Externo
- Tabela 3.1** - Ruído Total aos terminais da antena
- Tabela 3.2** - Associação em cadeia
- Tabela 3.3** - Distância máxima que o REP pode estar da EB
- Tabela 3.4** - Distância mínima que o REP pode estar da EB
- Tabela 3.5** - Potências de ruído no percurso descendente
- Tabela 3.6** - Potência mínimas do sinal no percurso descendente para a banda dos 900 MHz
- Tabela 3.7** - Potência mínimas do sinal no percurso descendente para a banda dos 1800 MHz
- Tabela 3.8** - Distância máxima do REP à EB
- Tabela 3.9** - Potências máximas no percurso descendente para GSM900 e GSM1800
- Tabela 3.10** - Distâncias mínimas entre a EB e o REP no percurso descendente
- Tabela 3.11** - Potência de saída do REP no percurso ascendente
- Tabela 3.12** - Distâncias máximas entre a EB e o REP no percurso ascendente
- Tabela 3.13** - Distâncias mínimas entre a EB e o REP no percurso descendente com APAC
- Tabela 3.14** - Potência de saída do REP no percurso ascendente com APAC
- Tabela 3.15** - Distâncias ao TM no exterior da carruagem para a ligação descendente
- Tabela 3.16** - Distâncias ao TM no exterior da carruagem para a ligação ascendente
- Tabela 3.17** - Benefícios da introdução do REP

LISTA DE SIGLAS

AMPS	-	Advanced Mobile Phone System
APAC	-	Automatic Power Adjust Circuit
AUC	-	<i>AUthentication Center</i>
BCCH	-	Broadcast Control CHannel
BSC	-	Base Station Controller
BSS	-	Base Station Subsystem
BTS	-	Base Transceiver Station
COST	-	European COoperation in fields of Scientific and Technical Research
EB	-	Estação Base
EIR	-	<i>EQUIPMENT Identity Register</i>
FDD	-	Frequency Division Duplex
FDMA	-	Frequency Division Multiple Access
GGSN	-	Gateway GPRS Support Node
GMSC	-	Gateway Mobile Switching Center
GPRS	-	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	-	Global System for Mobile communications
GSN	-	<i>GPRS Support Node</i>
HLR	-	Home Location Register
LOS	-	Line of Sight
MSC	-	Mobile Switching Center
NLOS	-	Non Line of Sight
NMT	-	Nordic Mobile Telephones
PDN	-	<i>Packet Data Networks</i>
REP	-	REPetidor
SGSN	-	Serving GPRS Support Node
SIM	-	Subscriber Identity Mode
TCH	-	Traffic CHannel
TDMA	-	Time Division Multiple Access
TEMS	-	Test Mobile Systems
TM	-	Terminal Móvel
VLR	-	Visitor Location Register

LISTA DE SÍMBOLOS

\bar{P}	-	Valor médio da potência do sinal
$P^{50\%}$	-	Valor mediano da potência do sinal
λ	-	Comprimento de onda
σ	-	Desvio padrão
Δf	-	Largura de banda
ΔP	-	Margem de desvanecimento
C/I_a	-	Relação Portadora Interferência Adjacente
C/I_c	-	Relação Portadora Interferência Co-canal
C/N	-	Relação Portadora Ruído
d	-	Distância
d_m	-	Distancia de vegetação atravessada pelo sinal
EB_{CTR}	-	Nível de referência de controlo de potência
EB_{SENS}	-	Nível de Sensibilidade da EB
$EIRP$	-	Potência Isotrópica Radiada
f	-	Frequência
FAF	-	Factor de atenuação do chão
F_{area}	-	Percentagem de área coberta numa célula
F_{cad}	-	Factor de ruído da cadeia
$fl(n)$	-	Frequência da portadora para o canal ascendente
$fu(n)$	-	Frequência da portadora para o canal descendente
G_{cad}	-	Ganho da cadeia
G_{div}	-	Ganho de diversidade espacial
G_{EB}	-	Ganho da EB
G_{ext}	-	Ganho da antena exterior do REP
G_{int}	-	Ganho da antena interior do REP
G_{TM}	-	Ganho do TM
H_b	-	Altura dos edifícios
h_b	-	Altura da EB
h_{be}	-	Altura efectiva da antena da EB
h_m	-	Altura do móvel
K	-	Constante de Boltzman
L_1	-	Atenuação de referência a uma distância de 1 m
L_{cabo1m}	-	Atenuação entre o REP e o TM a 1m do cabo radiante
L_{EB-REP}	-	Atenuação entre a EB e o REP
L_o	-	Atenuação de espaço livre
L_{obst}	-	Atenuação suplementar de obstáculo em lâmina
L_p	-	Atenuação de propagação
L_{p2}	-	Atenuação entre o REP e o TM fora da carruagem
L_{pEB-TM}	-	Atenuação de propagação entre a EB e o TM
L_{REP-TM}	-	Atenuação entre o REP e o TM
L_{Veg}	-	Atenuação suplementar devida à vegetação
N	-	Ruído
n	-	Factor de decaimento de potência com a distância
N_0	-	Ruído à saída do REP
N_{ent}	-	Ruído à entrada da antena exterior

N_i	-	Ruído à entrada do REP
N_{TM}	-	Ruído recebido pelo TM
P_{eEB}	-	Potência de emissão da EB
P_{eEBbal}	-	Potência de emissão da EB que equilibra as ligações
P_{eTM}	-	Potência de emissão do TM
P_i	-	Potência de entrada do REP
P_{maxEB}	-	Potência Máxima de Emissão da EB
$P_{maxMicroEB}$	-	Potência Máxima de Emissão da Micro EB
P_{maxTM}	-	Potência Máxima de Emissão do TM
P_o	-	Potência de saída do REP
P_{rEB}	-	Potência recebida pela EB
P_{rTM}	-	Potência recebida pelo TM
P_{sat}	-	Potência de saturação do REP
REP_{SENS}	-	Nível de Sensibilidade do REP
T_a	-	Temperatura de Ruído
VPL	-	Perdas de penetração no veículo

CAPÍTULO 1

Introdução

Hoje em dia as telecomunicações desempenham um papel fulcral no fluxo eficiente de informação. A utilização do telemóvel tem tido na última década um forte crescimento, não apenas em Portugal mas em todo o mundo, sendo este já considerado uma necessidade em vez de um luxo. Querer e poder comunicar em qualquer instante e lugar levaram ao desenvolvimento das comunicações móveis.

A História das comunicações móveis, inicia-se no final do século XIX com a descoberta de H. Hertz que demonstrou a possibilidade de propagação de ondas electromagnéticas em espaço livre. Esta e outras descobertas conjugadas com a invenção do telefone por Bell, levaram à possibilidade da criação de um sistema de telefone sem fios, utilizando ondas rádio. Nascia assim a ideia das comunicações móveis.

Foram aparecendo ao longo dos anos vários sistemas de rádio móvel, mas sem sucesso visto serem muito limitativos. É só em 1970, com o aparecimento do conceito celular que os sistemas de comunicações móveis assumem uma perspectiva de expansão realista. Os primeiros sistemas analógicos celulares a aparecer foram o NAMTS (1978, Japão), o NMT (1981, Noruega) e o AMPS (1983, EUA).

O aparecimento de problemas de capacidade e incompatibilidade entre os sistemas existentes levou as operadoras a reunirem-se, e em 1982 criarem um sistema que permitisse uma mobilidade total dentro da Europa: o GSM (*Global System for Mobile communications*). Este sistema evoluiu para se tornar digital, apresentando uma maior capacidade, segurança e robustez ao ruído e interferência. No entanto, o rápido crescimento de utilizadores no GSM tem criado problemas de congestão do sistema. As operadoras tendem a aumentar a capacidade dos sistemas instalados e estender a cobertura para os mais variados sítios, de modo a suportar o tráfego e a oferecer uma melhor qualidade de serviço.

Um dos locais onde o tráfego é abundante são os transportes públicos, em particular os comboios. Na tentativa de estender e melhorar a cobertura, faz-se neste trabalho um estudo sobre repetidores em GSM e estuda-se a possibilidade de os aplicar às carruagens de comboios.

No Capítulo 2 são estudados aspectos gerais do trabalho a realizar. Faz-se uma descrição do sistema GSM, mencionando a estrutura da rede, bandas de frequência e níveis de potência envolvidos. Efectua-se também uma descrição geral dos repetidores indicando quais as suas principais limitações. Refere-se ainda alguns modelos de propagação utilizados para ambientes interiores e exteriores, assim como um estudo de perdas de penetração em veículos.

No Capítulo 3 começa-se por descrever o equipamento utilizado na aplicação dos REPs em comboios. Faz-se também uma descrição dos ambientes e veículos nos quais foram efectuadas medidas de perdas por penetração, apresentando-se os resultados obtidos. São ainda efectuados alguns cálculos para abordar algumas limitações existentes na aplicação dos REPs tal como interferência e proximidade/afastamento das EBs. São também referidas quais as vantagens desta aplicação e a solução óptima para a aplicação dos REPs em comboios.

No Capítulo 4 estuda-se a aplicação dos REPs a uma linha ferroviária, em particular à linha Lisboa-Porto. A partir da rede de um dos operadores de comunicações móveis, já existente, faz-se uma estimativa das potências de emissão das EBs, dispostas ao longo da linha. É também efectuada uma descrição da campanha de medidas efectuada ao longo da

linha ferroviária. Posteriormente é feita uma análise e comparação das medidas efectuadas com os valores estimados. Para finalizar este capítulo é analisada a solução da CP, já instalada nos comboios Alfa Pendular.

No Capítulo 5 apresenta-se a síntese dos principais resultados e são tecidas algumas conclusões do trabalho.

Resta referir, que estudos sobre repetidores são temas um pouco escassos e difíceis de encontrar na bibliografia.

CAPÍTULO 2

Aspectos Teóricos

2.1 O Sistema GSM

2.1.1 Estrutura das redes GSM

De todas as interfaces do GSM [MoPa92], a sua parte rádio é provavelmente a mais importante, considerando que o nível de importância é proporcional ao tempo que levou a sua especificação. Este sistema tem como objectivo dar cobertura a uma determinada área, repartindo-a em pequenas áreas que se designam por células. A cada célula corresponde uma Estação Base (EB) que emite um determinado número de portadoras. De modo a contornar o problema de escassez do espectro, este sistema repete essas portadoras em células suficientemente distantes para evitar o aparecimento de interferências.

A arquitectura da rede GSM, Fig.2.1, constituída por vários elementos e respectivas interfaces é apresentada seguidamente.

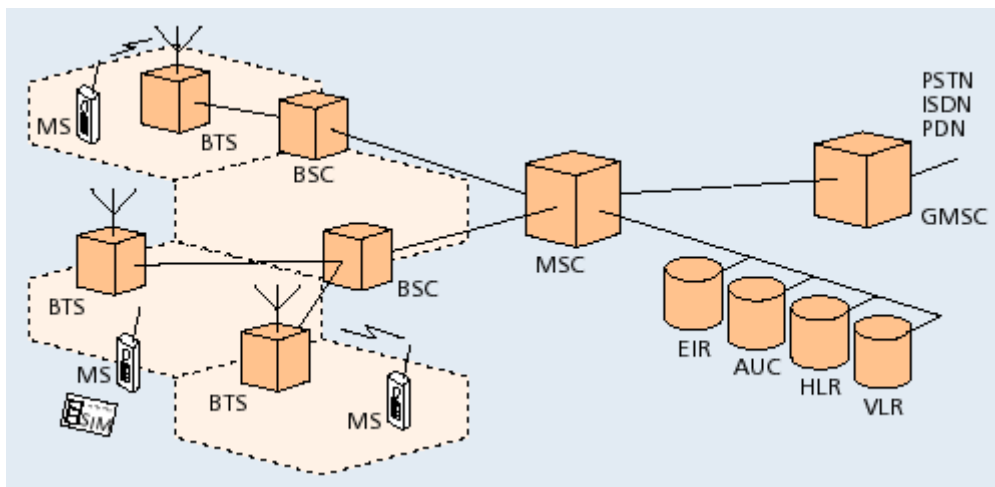


Figura 2.1 – Arquitectura da rede GSM (extraído de [BVEJ99]).

O Terminal Móvel (TM) (MS – *Mobile Station*), constituído pelo equipamento móvel e pelo cartão SIM (Subscriber Identity Module), é o equipamento utilizado para estabelecer a interface rádio entre o utilizador e a EB. Além de transmitir voz e dados, o TM realiza tarefas de controlo e sinalização.

O BSS (Base Station Subsystem) é composto por duas partes, as EBs (BTS – Base Transceiver Station) e os BSC (*Base Station Controller*). A EB contém os emissor/receptor rádio que estabelecem a ligação com os TMs. Os BSC fazem o controlo das EBs (ex: *handovers*) e executam a ligação entre o TM e os MSC (*Mobile Switching Center*).

Os MSC, centros de comutação móvel, pertencentes a outra camada do sistema, são constituídos por centrais telefónicas que estabelecem a interface entre outros pontos da rede e com a rede de telefone fixa (por exemplo, PSTN, ISDN) através do GMSC (*Gateway Mobile*

Switching Center). Sendo esta camada o topo da estrutura da rede GSM, é por isso responsável pelo controlo da mesma. Desempenha serviços como o registo de assinantes, a autenticação, tarifação e *handovers*.

O HLR (*Home Location Register*) e o VLR (*Visitor Location Register*) são registos, que juntamente com o MSC, realizam o encaminhamento de chamadas e o *roaming*. São usados outros dois registos, o EIR (*Equipment Identity Register*) e o AUC (*Authentication Center*), para questões de segurança e autenticação.

Actualmente, aliado ao GSM, aparece um novo serviço designado por GPRS (*General Packet Radio Service*) que permite a transmissão de dados por pacotes na rede móvel, e assim, o acesso a redes de comutação de pacotes. Desta forma, à arquitectura da rede GSM são adicionados alguns elementos, Fig. 2.2.

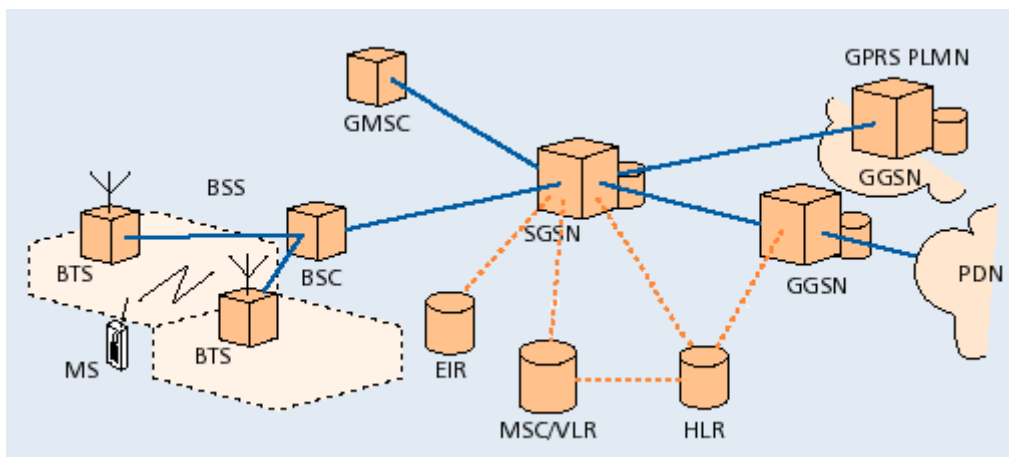


Figura 2.2 – Arquitectura da rede GPRS (extraído de [BVEJ99]).

Para integrar o GPRS na rede existente de GSM, são introduzidos uma nova classe de nós designados por GSN (*GPRS Support Node*). Estes nós são responsáveis pela entrega e encaminhamento dos pacotes de dados trocados entre o TM e as redes externas de comutação de pacotes (PDN – *Packet Data Networks*).

O SGSN (*Serving GPRS Support Node*) é responsável pela entrega de pacotes, de e para o TM, dentro da sua área de serviço. O GGSN (*Gateway GPRS Support Node*) actua como uma interface entre a rede GPRS e a PDN, convertendo os pacotes para o formato apropriado de acordo com o tipo de rede. De um modo geral, o GGSN é a interface para redes externas de comutação de pacotes para vários SGSNs; um SGSN pode encaminhar pacotes por diferentes GGSN para alcançar várias PDNs.

2.1.2 Bandas de Frequências e Acesso Múltiplo

O GSM foi inicialmente projectado como sistema celular a trabalhar na banda de frequências de 900 MHz (GSM900) [MoPa92], que inclui duas sub-bandas de 25 MHz cada uma, 890 a 915 MHz e 935 a 960 MHz, Fig. 2.3. A primeira destina-se à ligação TM-EB (canal ascendente) e outra à ligação EB-TM (canal descendente). Mais tarde uma segunda banda de frequências foi introduzida para os 1 800 MHz (GSM1800), que também se divide em duas sub-bandas, 1 710 a 1 785 MHz e 1 805 a 1 880 MHz, ou seja, duas vezes 75 MHz, Fig. 2.3. Como se verifica esta banda possui três vezes mais capacidade do que a banda dos 900 MHz.

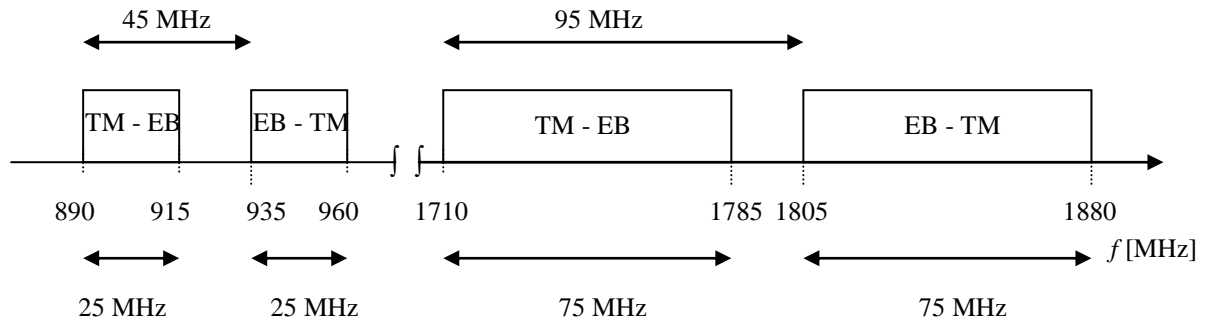


Figura 2.3 – Espectro de frequências de trabalho do GSM.

As portadoras (frequências centrais), separadas de 200 kHz, mantêm uma banda de guarda nos topos das bandas onde são distribuídas, Fig. 2.4, de modo a assegurar que não exista interferência com outros sistemas que funcionem com frequências adjacentes. Como medida de maior precaução as portadoras dos topos não costumam ser usadas, sendo exemplo disso a portadora número 0.

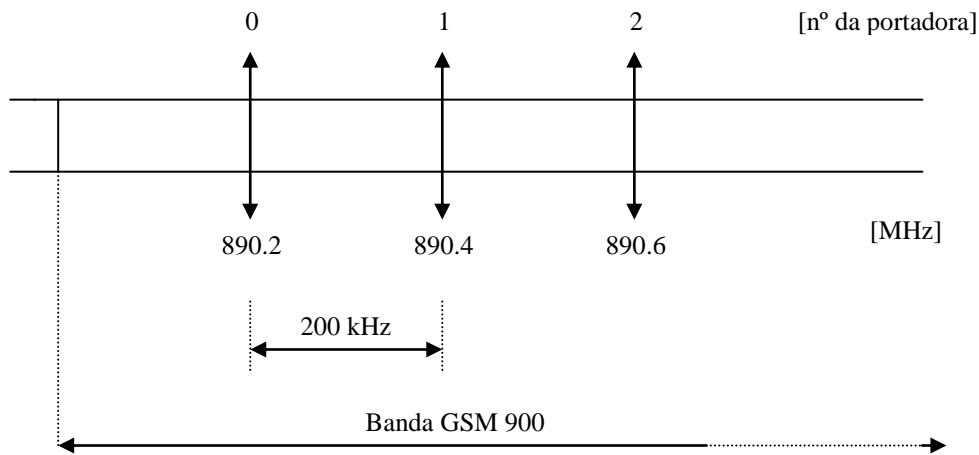


Figura 2.4– Portadoras no extremo da banda do GSM.

As frequências das portadoras em cada banda são:

$$\text{GSM900} \quad \begin{cases} f_l(n) = 890.2 + 0.2 * n & [\text{MHz}] \quad (0 \leq n \leq 123) \\ f_u(n) = f_l(n) + 45 & [\text{MHz}] \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\text{GSM1800} \quad \begin{cases} f_l(n) = 1710.2 + 0.2 * (n - 512) & [\text{MHz}] \quad (512 \leq n \leq 885) \\ f_u(n) = f_l(n) + 95 & [\text{MHz}] \end{cases} \quad (2.2)$$

onde $f_l(n)$ e $f_u(n)$ são as frequências das portadoras para os canais ascendente e descendente, respectivamente.

O espectro do GSM900 encontra-se dividido em 124 pares de portadoras e o do GSM1800 em 374 pares de portadoras. Como não se usa as portadoras dos topos, o número real de portadoras é de 122 e 372 para o GSM900 e GSM1800, respectivamente.

A eficiência espectral de um sistema celular [MoPa92] é um ponto importante para minimizar o seu custo. Por isso, a interface rádio do GSM procura obter uma eficiência

espectral máxima usando um esquema de acesso múltiplo. A escolha da técnica de acesso ao canal no GSM recaiu numa conjugação de divisão na frequência e no tempo (FDMA e TDMA); o FDMA consiste em dividir o espectro em várias portadoras, cada uma com largura de banda de 200 kHz; o TDMA divide no tempo cada portadora em 8 janelas (*time slots*), pelo que cada célula pode suportar 8 utilizadores por cada portadora que possui. Tratando-se de um sistema bidireccional, é ainda feita uma separação na frequência de modo a que os canais ascendente e descendente ocupem bandas de frequência diferentes (FDD). Atendendo ao número de portadoras nas bandas de frequência do GSM, o número de canais físicos para a banda dos 900 MHz é então de 984, enquanto na banda dos 1800 MHz se tem 2 976 canais físicos.

Para comunicar com a EB, o TM tem que se sincronizar e manter-se sincronizado com esta. Para isso são difundidos por cada EB alguns canais que transportam informação de controlo, podendo assim o TM escolher uma delas. A informação é difundida regularmente pelo canal designado por BCCH (Broadcast Control CHannel), e é recebida por todos os TMs no modo de escuta (*idle*).

O objectivo de um sistema de comunicações é transportar informação do utilizador, e para esse efeito é atribuído ao utilizador um canal dedicado, o TCH (Traffic CHannel). Por questões de eficiência espectral, este canal não está sempre disponível para o utilizador, e por isso, só lhe é atribuído quando surge essa necessidade (transporte de informação). No Anexo A apresenta-se uma lista de todos os canais lógicos, podendo estes estar associados a funções de tráfego ou de controlo.

Uma outra característica do GSM é a distância máxima [Stee92] para a qual é permitido ao TM comunicar com a EB é de 35 km. Esta limitação advém do tempo que o sinal de rádio leva a percorrer 70 km desde o TM até à EB e regressar. Este tempo, 233.3 μ s, é contemplado no período de guarda da rajada de acesso (*access burst*). Esta rajada encontra-se no Anexo B juntamente com a trama do GSM e todas as outras rajadas existentes. A duração de um bit é de 3.69 μ s, e o período de guarda desta rajada tem 68.25 bit o que corresponde a 252 μ s. O período de guarda serve para os sinais dos vários TM não se sobrepor uns aos outros. Um período de guarda tão grande na rajada de acesso serve para o TM obter o primeiro acesso à EB ou em casos de *handover*.

2.1.3 Níveis de Potências

O equipamento rádio em GSM pode ser classificado por classes de potência [ETSI93], que correspondem a diferentes potências de emissão, consoante a banda de frequências em que está a operar (900 MHz ou 1 800 MHz).

As classes de potência de emissão dos TMs, referidas à potência máxima que estes podem transmitir, são definidas de maneira diferente para o GSM900 e GSM1800, Tab. 2.1. Actualmente, as classes de potência tipicamente usadas são as seguintes: classe 4 para o GSM900 e classe 1 para o GSM1800. No caso de se tratar de um TM que opera nas duas bandas (*dualband*) utiliza uma das classes de potência para cada uma das bandas.

Classes de Potência	P_{maxTM}			
	GSM900		GSM1800	
	[W]	[dBm]	[W]	[dBm]
1	-	-	1	30
2	8	39	0.25	24
3	5	37	4	36
4	2	33	-	-
5	0.8	29	-	-

Tabela 2.1 – Classes de potência dos TMs (extraída de [ETSI97a], [ETSI97b]).

As potências máximas da EB medidas à saída do emissor são dadas também de acordo com as suas classes, Tab. 2.2.

Classes de Potência	P_{maxEB}			
	GSM900		GSM1800	
	[W]	[dBm]	[W]	[dBm]
1	320	55	20	43
2	160	52	10	40
3	80	49	5	37
4	40	46	2.5	34
5	20	43	-	-
6	10	40	-	-
7	5	37	-	-
8	2.5	34	-	-

Tabela 2.2 – Classes de potência das EBs (extraída de [ETSI97a], [ETSI97b]).

As classes de potência mais usadas para as EBs dependem fortemente do tipo de aplicação a que estão destinadas. Existem basicamente três tipos de células às quais normalmente se aplicam diferentes potências de emissão nas EBs. As *Macro* células têm um raio de cobertura típico de 1 a 35 km, estando as antenas normalmente colocadas nos topos dos montes ou nos telhados dos edifícios. Hoje em dia, as classes de potência normalmente usadas para este tipo de células são as 3 e 4 para GSM900, devido às elevadas distâncias a cobrir. Devido ao facto da atenuação por propagação ser superior para a banda GSM1800, não se encontram muitas EBs com potência diferente da classe 1. Além disso esta banda de frequências não costuma ser usada em *Macro* células de grande dimensão, uma vez que estas são tipicamente usadas em ambientes rurais onde normalmente não existem problemas de capacidade de tráfego e logo menos necessidades de espectro. As *Micro* células têm raios de cobertura que vão dos 0.1 a 1 km. Com as antenas colocadas abaixo dos topos dos edifícios com o objectivo de maior parte da propagação rádio se efectuar ao longo das ruas por entre os prédios. Aqui as classes de potência são agrupadas de outra forma, como se descreve na Tab. 2.3.

Classes de Potência	$P_{maxMicroEB}$			
	GSM900		GSM1800	
	[W]	[dBm]	[W]	[dBm]
M1	0.25	24	1.6	32
M2	0.08	19	0.5	27
M3	0.03	14	0.16	22

Tabela 2.3 – Classes de potência das EBs *Micro* (extraída de [ETSI97a], [ETSI97b]).

As *Pico* células destinam-se essencialmente ao interior dos edifícios, requerendo assim potências menores.

Note-se que todas as potências de emissão das EBs descritas nas tabelas anteriores referem-se ao valor medido à entrada do combinador.

Para que não exista erros de transmissão, é exigido que o nível médio de potência de sinal recebido pelo TM e pela EB seja superior a um determinado nível de referência, denominado por nível de sensibilidade. Apresentam-se estes valores na Tab. 2.4 para ambas as bandas do GSM.

Dispositivo	Sensibilidade de referência	
	GSM900	GSM1800
	[dBm]	[dBm]
TM	-102	-100
EB	-104	-104

Tabela 2.4 – Níveis de sensibilidade (extraído de [ETSI97a], [ETSI97b]).

2.1.4 Interferência e Ruído

A interferência é um dos grandes males existentes nos sistemas de telefone celular. Esta surge em duas vertentes: a interferência co-canal e a interferência de canal adjacente.

A interferência co-canal é medida através da relação C/I_c , [Corr99], onde C é a potência da portadora do sinal desejado e I_c a potência da portadora do sinal interferente, e pode ser reduzida usando antenas direccionais ou escolhendo cuidadosamente a localização da EB. Uma outra solução para diminuir a interferência co-canal é a sectorização das células, onde estas são normalmente divididas em três sectores, atribuindo a cada sector um grupo de canais distintos; desta forma, sectorizando um grupo de células omnidireccionais com o uso de antenas direccionais aumenta-se significativamente a relação C/I_c . Para o sistema GSM é imposto um valor mínimo para a relação C/I_c de 9 dB [ETSI97a].

Um outro fenómeno que é responsável por interferência é a propagação por multipercurso, que é originado nas reflexões e difracções que o sinal sofre por diferentes obstáculos desde o emissor até ao receptor. Todos estes vários caminhos levam à recepção de várias cópias do sinal, ligeiramente atrasadas no tempo umas em relação às outras. No sistema GSM quando é recebido o mesmo sinal por dois percursos diferentes, o receptor consegue combinar esses sinais se a diferença de atrasos pelos dois percursos for inferior a 16 μ s [MoPA92]; para cima deste valor, o sinal mais atrasado já é considerado interferente se não respeitar a relação C/I_c .

A interferência de canal adjacente consiste no aparecimento do sinal interferente, proveniente de um canal adjacente, na banda do sinal desejado. Esta pode ser reduzida com o aumento das distâncias entre canais adjacentes, aumento da separação entre canais e controlo da potência de emissão no TM e na EB. O nível de referência de C/I_a é [ETSI97a]:

- canal adjacente a 200 kHz: $C/I_a = -9$ dB
- canal adjacente a 400 kHz: $C/I_a = -41$ dB
- canal adjacente a 600 kHz: $C/I_a = -49$ dB

O GSM possibilita ainda modificar a potência de emissão do TM e da EB dentro de certos limites. Este controlo de potência [MoPa92] traz grandes vantagens, tais como minimizar a interferência co-canal e economizar a energia, vindo além disso vem resolver o chamado efeito Perto/Longe (*Near/Far effect*). Como já foi descrito, existem várias classes de equipamentos consoante o nível de potência emitida. Quando no lado da recepção a

qualidade do sinal é muito boa, torna-se vantajoso reduzir a potência do lado do emissor, nunca deixando de se ter um bom nível de qualidade.

Este controlo de potência é iniciado pelo TM que mede o nível de potência do sinal recebido ou a sua qualidade (consoante a probabilidade de erro), sendo a informação enviada para a EB que decide quando o nível de potência deve ser incrementado ou não, tendo em conta o nível da sensibilidade de referência. A EB também faz medidas de potência do sinal enviado pelo TM a fim de também decidir se este deve alterar o seu nível de potência de emissão. Para cada TM, as potências de emissão nos canais ascendente e descendente podem ser controladas independentemente. Os níveis de potência de emissão podem ser alterados, com incrementos ou decrementos de 2 dB, do nível máximo de potência até a um mínimo que depende do tipo de equipamentos. No caso dos TMs este mínimo é de 5 e 0 dBm para todas as classes da banda GSM900 e GSM1800 respectivamente, e para as EBs o mínimo encontra-se abaixo da potência máxima de emissão cerca de 30 dB.

No que diz respeito ao efeito Perto/Longe, este é reduzido com o uso de controlo de potência. O efeito provoca o aparecimento de interferência do tipo de canal adjacente entre os sinais provenientes de vários TMs a distâncias diferentes da EB, pois, sem controlo de potência, a EB recebe o sinal de um TM que esteja perto de si com um nível de potência bastante mais elevado do que um outro TM mais longe. O algoritmo de controlo de potência modifica a potência emitida pelos TMs de maneira a que os diversos sinais cheguem à EB com o mesmo valor, evitando-se assim a interferência de canal adjacente.

Para que exista um mínimo de qualidade de serviço no sistema GSM, a relação sinal ruído (C/N) mínima é de 8 dB. Tal como a relação C/I , esta relação depende das condições e efeitos de propagação. Assim, em termos de planeamento, é usual adicionar margens de segurança nas relações C/I e C/N . Normalmente, o ruído térmico é desprezável face à interferência:

$$\frac{C}{N+I} \cong \frac{C}{I} \quad (2.3)$$

O ruído que predomina nas bandas do GSM [Hall79] é o originado pelo homem. O valor médio da potência de ruído pode ser estimado a partir de:

$$N = K \cdot T_a \cdot \Delta f \quad (2.4)$$

onde K é a constante de Boltzman, T_a é a temperatura de ruído e Δf é a largura de banda (200 kHz). A temperatura de ruído T_a pode ser obtida através da Fig. C.1 no Anexo C. Em unidades logarítmicas o ruído vem dado por:

$$N_{[\text{dBm}]} = -145.59 + 10 \log(T_{a[\text{K}]}) \quad (2.5)$$

Na Tab. 2.5 encontra-se os valores de ruído externo N e a temperatura de ruído externa que envolve a antena T_a , obtida através da Fig. C.1, para as duas bandas de frequências e para dois tipos de cenários: zonas comerciais e zonas rurais. Considera-se que o ruído é calculado para uma largura de banda de uma portadora (200 kHz).

	Zonas Comerciais		Zonas Rurais	
	Ta [K]	Na [dBm]	Ta [K]	Na [dBm]
GSM900	100	-125.6	10	-135.6
GSM1800	25	-131.6	2	-142.6

Tabela 2.5 – Ruído Externo.

Pode-se observar que se obtém menores valores de potência de ruído para o GSM1800 e que as zonas comerciais têm valores maiores comparativamente com as zonas rurais.

2.2 Repetidores

Por vezes, num sistema de comunicações de rádio móvel, uma célula não consegue ter toda a sua área coberta pela EB, isto é, existem zonas de sombra, que são tipicamente vales, túneis ou sítios escondidos por obstáculos que podem ser naturais ou construções artificiais. Esses obstáculos introduzem uma atenuação à passagem do sinal tornando-o insatisfatório ou inexistente.

Se não é possível solucionar o problema através de ligeiras alterações nas EBs existentes, opta-se por recorrer a uma das seguintes soluções: adiciona-se uma nova EB ou usa-se um repetidor (REP). No caso da primeira opção, além de se resolver o problema de cobertura aumenta-se também a capacidade de tráfego; no entanto, os encargos a suportar são consideravelmente superiores aos da segunda opção, que contudo não proporciona um aumento da capacidade de tráfego.

De uma forma generalista e simples, pode-se descrever um REP como um amplificador bidireccional [Miko99], uma vez que o sinal descendente originado na EB é amplificado e transmitido para o TM na zona de sombra, e por outro lado o sinal ascendente é tratado da mesma forma. Os sinais ascendentes e descendentes são separados através de *duplexers* e depois amplificados. No caso de ser necessário respeitar as frequências de outros sistemas, o sinal é também filtrado. Os ganhos em ambas as direcções podem ser ajustados separadamente, e em grande parte das situações, a antena na direcção da EB tem um ganho elevado, por normalmente se escolher uma antena direccionada. No entanto, o tipo de antenas usadas em ambas as direcções depende sempre do ambiente onde se insere o REP.

O ganho nas ligações ascendente e descendente deve tomar valores que permita equilibrar as ligações. Note-se que, com a introdução do REP, se perde diversidade no percurso ascendente entre o TM e o REP. A qualidade da comunicação é determinada pela pior ligação, ascendente ou descendente, logo não interessa impor num dos percursos uma potência muito alta, pois esta seria desperdiçada.

O ganho do REP, dentro da banda de frequências de trabalho, deve ser o mais estável possível [ETSI95], para assegurar que as chamadas que são iniciadas na frequência do BCCH sejam mantidas quando ao TCH é atribuída uma frequência diferente.

É também necessário garantir um isolamento entre as duas antenas [ETSI95] de forma a evitar que o REP entre em oscilação. Importa assim garantir que parte do sinal de saída somado à entrada não venha reforçar a amplitude da saída, evitando assim indesejável realimentação positiva. O isolamento entre antenas é assim a diferença entre o ganho do REP e a atenuação por propagação entre antenas, que deverá ser pelo menos de 15 dB [ETSI95]. Esta margem tem de ser medida na situação de funcionamento do REP, pois o isolamento varia com as condições impostas no ambiente envolvente. No Anexo D encontra-se a situação de realimentação em causa, apresentando-se além disso o valor do ganho com realimentação para diversos níveis de isolamento numa situação em que se aplica um REP

típico. Pode-se verificar que o ganho global da cadeia aproxima-se do ganho do REP quando o isolamento entre as antenas toma valores próximos de 15 dB, enquanto que para valores menores que 15 dB o ganho global da cadeia tende a aumentar e o sistema poderá entrar facilmente em oscilação por uma ligeira alteração do ambiente envolvente.

As diferentes classes de REPs são identificadas consoante os parâmetros em jogo, e são as várias aplicações existentes que descrevem qual a melhor classe de repetidor a ser usada. Os repetidores são classificados pelas seguintes características [Miko99]: selectividade na frequência e níveis de potência e ganho.

Quanto à selectividade na frequência, os REPs classificam-se pelas seguintes classes: de banda larga (*broad band repeaters*), selectivos à banda (*band selectivity repeaters*), selectivos ao canal (*channel selectivity repeaters*) e com desvio de frequência (*frequency shifting repeaters*). As características de cada uma destas classes estão especificadas no Anexo E. Cada tipo de REP existente é aplicado consoante as situações de cobertura a solucionar que podem ser tão diversas que é necessário escolher o REP que melhor se enquadra num planeamento de frequências já existente; o mesmo se aplica aos ganhos e valores de potências envolvidos.

A Fig. 2.5 apresenta uma situação genérica de introdução de um REP numa ligação entre a EB e o TM.

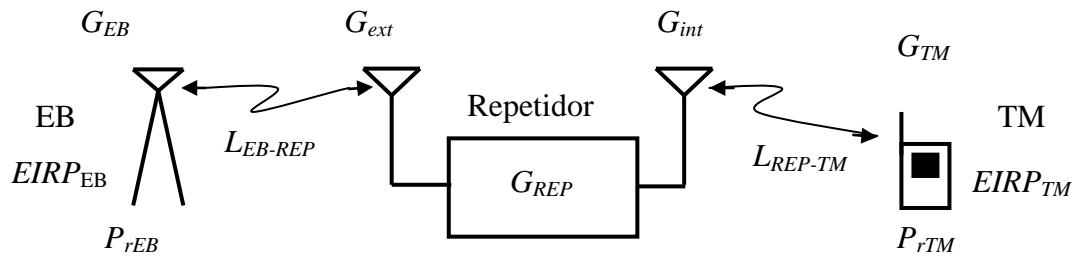


Figura 2.5 – Balanceamento de potências nos canais ascendente e descendente.

Os níveis de potência envolvidos numa ligação rádio com um REP, Fig. 2.5, são descritos por (2.6) a (2.9). Estas expressões dão o valor da potência recebida pelo TM, P_{rTM} e pela EB, P_{rEB} .

- EB a Emitir:

$$P_{rTM} [\text{dBm}] = EIRP_{EB} [\text{dBm}] + G_{TM} [\text{dBi}] - L_{EB-REP} [\text{dB}] + G_{REP-Ant} [\text{dB}] - L_{REP-TM} [\text{dB}] \quad (2.6)$$

com

$$EIRP_{EB} [\text{dBm}] = P_{eEB} [\text{dBm}] + G_{EB} [\text{dBi}] \quad (2.7)$$

$$G_{REP-Ant} [\text{dB}] = G_{REP} [\text{dB}] + G_{ext} [\text{dBi}] + G_{int} [\text{dBi}] \quad (2.8)$$

- TM a Emitir:

$$P_{rEB} [\text{dBm}] = EIRP_{TM} [\text{dBm}] + G_{EB} [\text{dBi}] - L_{REP-TM} [\text{dB}] + G_{REP-Ant} [\text{dB}] - L_{EB-REP} [\text{dB}] + G_{div} [\text{dB}] \quad (2.9)$$

com

$$EIRP_{TM[\text{dBm}]} = P_{eTM[\text{dBm}]} + G_{TM[\text{dB}]} \quad (2.10)$$

onde P_{eEB} e P_{eTM} são as potências de emissão da EB e do TM respectivamente, G_{EB} e G_{TM} são os ganhos da EB e do TM respectivamente, $G_{REP-Ant}$ é a soma do ganho do repetidor G_{REP} com os ganhos das antenas G_{ext} e G_{int} , L_{EB-REP} é a atenuação por propagação entre a EB e o REP, L_{REP-TM} é a atenuação por propagação entre o REP e o TM, e G_{div} é o ganho de diversidade espacial existente na EB. Não são contabilizadas nesta situação as atenuações de cabos.

A introdução de um REP numa ligação entre a EB e o TM origina algumas limitações, que podem ser ao nível do balanceamento de potências e alterações na distância máxima entre TM e EB devido ao atraso introduzido pelo REP, que por sua vez pode levantar problemas de interferência. Todas estas questões são abordadas seguidamente.

Como já foi referido anteriormente nesta Secção, a distância máxima para a qual é permitido ao TM comunicar com a EB é de 35 km, vindo o atraso introduzido pelo repetidor encurtar esta distância. Um atraso típico de 7 μs irá reduzir o raio de alcance da EB de 2.1 km, o que não é muito limitativo devido ao número elevado de EBs existentes numa área de serviço.

Foi também já mencionada a relação entre o multipercurso e a interferência co-canal. Abordar esta questão ao nível do atraso entre o sinal directo da EB e uma cópia deste sinal que passa pelo REP via TM poderá ser interessante. Devido à existência do REP a margem de 16 μs , aceitável para multipercurso, é reduzida de um atraso típico de 7 μs , introduzido por este equipamento, pelo que o ponto onde os dois sinais se encontram com uma diferença temporal entre eles de 9 μs está a 1.35 km do REP no sentido da EB, na hipótese de considerar o caso em que este ponto se encontra na mesma linha recta que une EB e REP. Esta distância representa em segundos metade da margem agora existente, visto um dos sinais ter de ir ao REP e voltar atrás. No entanto, o facto de os dois sinais serem interferentes ao se encontrarem depende do nível de potência que cada um tem, que por sua vez depende fortemente das atenuações sofridas por cada sinal e da direcção dos sectores da EB e REP.

No que diz respeito ao balanceamento de potências é necessário notar que o repetidor irá limitar os valores de potência envolvidos, inferiormente pelo ruído que também é amplificado, e superiormente pela saturação do repetidor.

O ruído térmico externo e ruído interno à cadeia onde se enquadra o repetidor é amplificado para valores que podem ser comprometedores para a ligação. No Anexo F pode-se encontrar os procedimentos necessários para se obter o factor de ruído de uma cadeia constituída por antenas e cabos ligados ao REP. Tendo em conta o ruído térmico externo apresentado anteriormente, o ruído à saída é dado por:

$$N_{o[\text{dBm}]} = N_{i[\text{dBm}]} + F_{cad[\text{dB}]} + G_{cad[\text{dB}]} \quad (2.11)$$

onde N_i é somente o ruído térmico externo no caso de se considerar o ruído interno da antena desprezável, F_{cad} é o factor de ruído total da cadeia e o G_{cad} o respectivo ganho.

Após obtido o valor deste ruído pode-se saber qual a potência mínima de recepção acima da qual o receptor (EB ou TM) deve operar para que a ligação não fique deteriorada. Assim é necessário estimar a potência de ruído que chega ao receptor após sofrer a atenuação, L_p , pelo percurso percorrido, ao que se deve ser acrescentado uma margem de segurança maior ou igual à relação C/I_c . Esta potência mínima é dada por:

$$P_{R\text{min}[\text{dBm}]} = N_{o[\text{dBm}]} - L_{p[\text{dBm}]} + \left(\frac{C}{I_c} \right)_{[\text{dB}]} \quad (2.12)$$

No caso de se verificar uma situação em que os receptores se encontram na proximidade do repetidor, esta potência mínima pode atingir valores superiores à sensibilidade dos aparelhos, obrigando a que as potências de emissão em jogo tenham de ser superiores para garantir este mínimo.

Como limite superior tem-se a potência máxima de emissão do repetidor, que dependendo do repetidor e seu respectivo ganho, irá limitar a potência de recepção à entrada da cadeia onde se encontra o repetidor por forma a que este não entre em saturação. É importante garantir que a proximidade dos emissores e os valores de potência por eles emitida não forcem o repetidor a operar a potências acima daquelas para que está preparado. Quando o repetidor entra na zona de saturação, face à amplitude do sinal de entrada, a sua característica deixa de ser linear, obtendo-se deste modo à saída harmónicas de sinais de entrada (multiplicação de frequência), bem como de sinais de frequência igual a combinações lineares dos sinais de entrada, ou seja, são gerados produtos de intermodulação. Para evitar estes produtos, é necessário ter o cuidado de não deixar o REP entrar nessa zona de não linearidade; além disso, há que ter cuidado com o ganho do REP fora da banda que se quer amplificar. O ganho do REP fora da banda do GSM, para não gerar harmónicas de sinais aplicados na entrada, no canal ascendente e descendente, não pode tomar valores maiores que [ETSI97]:

- 50 dB @ 400 kHz
- 40 dB @ 600 kHz
- 35 dB @ 1 MHz
- 25 dB @ 5 MHz

do topo da banda do GSM.

2.3 Modelos de propagação

Nos sistemas de comunicação celular é essencial prever as zonas limites onde o nível de sinal é mínimo e as zonas onde pode haver interferência. O planeamento das áreas de cobertura requer a estimação do sinal ao longo destas, recorrendo-se para tal a vários modelos consoante for o cenário de propagação. A adequação do modelo à realidade depende muitas vezes do rigor com que se conhece o ambiente onde ele é aplicado.

Os modelos existentes dividem-se em duas categorias: empíricos e teóricos. Os modelos empíricos são baseados em medidas efectuadas num cenário de propagação específico que conduzem a relações entre a atenuação e distância, e têm a vantagem de contabilizar todos os factores que afectam a propagação, mas só são aplicáveis a locais com as mesmas condições ambientais, não podendo ser aplicados a qualquer tipo de cenário. Os modelos teóricos não são capazes de contabilizar todos os factores associados à propagação do sinal e não têm em consideração o ambiente em que o terminal móvel se desloca; têm como principal vantagem permitir uma fácil alteração dos parâmetros de entrada, não estando restritos a nenhum cenário em especial, e a sua precisão depende da informação de bases de dados geográficas assim como da sua representação da realidade.

É importante referir que o nível de sinal recebido varia quer no tempo quer com o local. Nas comunicações móveis ambas as variações temporal e espacial são muito importantes, mas a variação temporal é menos significativa face à espacial. Esta última é denominada por desvanecimento, que pode surgir em duas vertentes: o desvanecimento rápido, se as variações da potência forem rápidas ou, caso contrário, temos desvanecimento lento.

O desvanecimento rápido resulta do facto de nos ambientes urbanos, em geral, não existir linha de vista entre a EB e o TM, sendo a propagação feita por rerradiação e difracção,

ou seja, existe multipercurso. A soma construtiva ou destrutiva dos vários sinais recebidos segue aproximadamente uma distribuição de Rayleigh (no caso de existir raio directo usa-se uma distribuição de Rice). O desvanecimento lento é caracterizado por uma distribuição log-normal, sendo este provocado por variações da escala do cenário de propagação à medida que o TM se desloca. O desvanecimento não é contabilizado pelos modelos de propagação, uma vez que seria necessário conhecer todos os factores que influenciam a propagação, sendo no entanto, ser contabilizado através de uma margem de desvanecimento.

Os modelos que seguidamente se descrevem apenas estimam o valor mediano do nível do sinal e a variação em torno deste. Para tal, os modelos propõem uma expressão para a atenuação de propagação que varia consoante o ambiente, apresentando-se dois modelos de propagação para ambientes exteriores e outros dois para ambientes interiores. Os modelos para ambientes exteriores são o Okumura-Hata [Hata80] e o COST-231-WI [COST91], que são os mais usados para calcular a atenuação por propagação entre a EB e o TM. Modelos de propagação para interiores tendem a apresentar uma solução para cada ambiente específico a cobrir, através de correcções ligeiras a modelos de propagação existentes. Posteriormente à apresentação dos modelos de propagação, segue-se uma referência a um estudo sobre medidas de perdas por penetração em certos veículos automóveis.

O modelo de Okumura [Okum68] é um modelo empírico, desenvolvido com base num conjunto de medidas efectuadas em Tóquio na banda [150, 2000] MHz. Foi desenvolvido para ser utilizado em zonas edificadas e contabiliza topografia e urbanização através da introdução de factores de correcção, a aplicar quando os ambientes o exigirem. Neste modelo, as frequências da banda GSM900 e GSM1800 encontram-se dentro dos limites de validade, assim como as dimensões típicas das células usadas nesse sistema. Mais tarde, em 1980, Hata [Hata80] baseou-se nas curvas obtidas por Okumura e estabeleceu expressões que aproximam algumas dessas curvas. As expressões para a atenuação de propagação deste modelo encontram-se descritas no Anexo G, que são válidas para frequências $f \in [150, 2000]$ MHz, alturas efectivas da EB $h_{be} \in [30, 200]$ m, distâncias da EB ao TM $d \in [1, 20]$ km, e alturas do TM $h_m \in [1, 10]$ m.

O COST 231-WI [COST91] desenvolveu um modelo que conjuga dois modelos de propagação, Ikegami [IYTU84] e Walfisch-Bertoni [WaBe88], com os resultados de medidas realizadas em cidades europeias (Modelo Cost 231 - Walfisch - Ikegami). Trata-se de uma mistura de duas componentes, a teórica, resultante dos modelos em que se baseia, e a empírica, baseada nas medidas anteriormente mencionadas, obtendo-se assim a aproximação das expressões teóricas existentes à realidade dos ambientes de aplicação. Este modelo é um dos mais apropriados para calcular a atenuação de propagação entre a EB e o TM em ambientes urbanos exteriores. As expressões deste modelo encontram-se no Anexo G, sendo válidas para frequências $f \in [800, 2000]$ MHz, alturas da EB $h_b \in [4, 50]$ m, distâncias entre a EB e o TM $d \in [0.02, 5]$ km, e alturas do TM $h_m \in [1, 3]$ m.

Keenan e Motley [MaRo96] foram os primeiros a propor um modelo para ambientes interiores, que sofreu depois várias extensões, sendo aqui apresentada uma delas. A extensão 2 deste modelo descreve a atenuação de propagação como função de L_l , atenuação de referência a uma distância de 1 m, do factor de decaimento de potência n com a distância, e tem em conta os diversos tipos de paredes e andares de acordo com o material de construção. A sua expressão é apresentada no Anexo H. Valores típicos para o factor de perdas nas paredes são para a frequência de 900 MHz de 2.49 dB para paredes de tijolo, 1.30 dB para placas de gesso e 10.82 dB para betão.

Um outro modelo para ambientes interiores, que também resulta de simulações, é proposto por Chandra [Chan99]. Trata-se de um modelo para corredores e em múltiplos andares, onde as paredes do corredor são de betão com superfícies lisas e as janelas de vidro

ocuparam $\frac{1}{2}$ de uma das paredes, sendo a EB colocada no último de 3 andares (as medidas foram realizadas nos 3 andares). As expressões para atenuação com linha de vista (LOS) e sem linha de vista (NLOS) são apresentadas no Anexo H, assim como os resultados obtidos e simulados. Pode-se verificar nesse anexo que o valor obtido de *FAF* entre o andar da EB e o seguinte foi de 25.7 dB e 23.8 dB para as frequências de 900 MHz e 1 800 MHz respectivamente; para a transição dos dois seguintes andares o valor obtido foi de 22.0 e 17.6 dB, também para as mesmas frequências.

Kostanic [KHM98] propôs um modelo empírico para contabilizar as perdas por penetração (atenuação) em veículos na banda dos 800 MHz. As medidas foram feitas de modo a obter a potência recebida no interior, P_{in} , e exterior, P_{out} , do veículo, para obter as perdas de penetração dada por:

$$VPI_{[dB]} = 10 \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (2.13)$$

Neste modelo, são feitas medidas em três tipos de veículos (*mini van*, *full size car* e *sports car*) e em dois tipos de ambientes de propagação (urbano e suburbano). É também colocado o receptor (antena de recepção) em duas posições: horizontalmente no banco do passageiro; perto da cabeça do condutor). Para cada tipo de veículo são apresentados no **Anexo H** o valor médio da atenuação \bar{A} e o desvio padrão σ para os diferentes ambientes de propagação e para as diferentes posições da antena de recepção. Como se pode verificar para o veículo tipo *Mini Van*, Tab. H.2, o valor médio das perdas por penetração está entre 8.2 e 9.6 dB com desvio padrão por volta de 3 dB. A atenuação é maior no caso em que antena está junto à cabeça do condutor, o que se pode dever ao facto de haver perdas na cabeça humana ou principalmente porque neste caso a antena está mais junto ao tejadilho de metal que actua como um bom reflector de ondas. A Tab. H.3 descreve os resultados da atenuação no veículo tipo *Full Size Car*, onde o valor médio da atenuação é de aproximadamente 8 dB com um desvio padrão que varia entre 2 e 3 dB; pode-se concluir que este veículo e o anterior exibem aproximadamente as mesmas perdas de penetração. Por fim os resultados para *Sports Car* estão na Tab. H.4; neste caso a atenuação é consideravelmente maior que nos casos anteriores, o que se deve ao facto de os carros desportivos terem janelas mais pequenas.

CAPÍTULO 3

Dimensionamento

3.1 Equipamento Disponível

Neste capítulo pretende-se estudar o comportamento dos repetidores numa situação de mobilidade dos mesmos. Esta situação de mobilidade é criada pela aplicação dos repetidores em comboios. Com o uso destes equipamentos pretende-se estender a cobertura e melhorar a qualidade de sinal que chega aos passageiros. Como se pode verificar no capítulo anterior, existem perdas elevadas do sinal por penetração em veículos automóveis, uma vez que estes são revestidos a metal. Nos comboios esse facto não é excepção e a solução pensada para solucionar este problema é recorrer aos repetidores. Como já foi mencionado anteriormente, associado ao repetidor nesta aplicação incluem-se outros equipamentos como antenas exteriores e interiores e os respectivos cabos de ligação. Seguidamente importa caracterizar todos estes equipamentos.

Ao longo da linha de comboio, devido ao número elevado de EB existentes, o repetidor tem de amplificar todas as portadoras do espectro GSM, pelo o que o equipamento existente para este tipo de aplicação é de banda larga, podendo os ganhos destes repetidores ir de 30 a 85 dB. Existem vários repetidores possíveis para esta aplicação, cujo ganho pode ser ajustado ou não dentro de uma gama variável e independentemente para cada uma das ligações ascendente e descendente. Como exemplo de repetidores para a banda GSM900 tem-se o repetidor Kathrein 700 686, [KaRP97], com ganhos não tão elevados como o repetidor Mikom MOR3101B, [MREP99], (o primeiro encontra-se actualmente instalado no comboio Alfa Pendular). Um exemplo de repetidor com os ganhos fixos para as duas ligações, é proposto pela Mikom para equipar os comboios; este repetidor, MIRTX01 [MIRT00], pode ser usado em diversas bandas do GSM, e já existe a versão para próxima geração das comunicações móveis. No que diz respeito ao nível de potência máximo à saída, pode-se encontrar valores de cerca de 20 e 30 dBm por portadora para a ligação descendente e ascendente respectivamente, no caso do repetidor Kathrein 700 686, [KaRP97], a ligação descendente é superior chegando a cerca de 30 dBm. Existem no entanto outras opções de potência máxima de saída para cada um dos repetidores.

As antenas exteriores existentes para aplicar no comboio possuem ganhos pequenos (por volta dos 0 dBi), pois estas têm que ser aerodinâmicas e de dimensões reduzidas, face à aplicação em causa. Como exemplo refere-se a antena Kathrein 736 970, [Kant97], para a banda GSM900, também ela fazendo parte da solução actual do Alfa Pendular.

No interior da carruagem pode-se optar por vários tipos de antenas. Uma solução é por exemplo, uma antena do tipo dipolo com um ganho não muito elevado (2 dBi), uma vez que a área que se quer cobrir não é muito extensa [Sant98]. No que diz respeito ao diagrama de radiação, o dipolo tem a desvantagem de apresentar um mínimo exactamente abaixo da sua posição quando se instala a antena na vertical junto ao tecto. Uma vez que a carruagem se trata de uma cavidade ressonante com pequenos orifícios, que neste caso são as janelas, é muito difícil contabilizar os efeitos deste mínimo; no entanto trata-se efectivamente de uma situação de não uniformidade ao longo da carruagem, que pode ser solucionada pelo uso de outro tipo de antenas.

Uma alternativa é uma antena do tipo impressa ou a opção pelo uso de um cabo radiante. Embora a antena impressa apresente um diagrama de radiação que melhor se adapta

à carruagem, continuaria a existir grandes diferenças entre as distâncias percorridas pelos sinais dirigidos a TMs na proximidade da antena e mais afastados; com o uso de um cabo radiante, os TMs encontram-se todos à mesma distância da antena recebendo todos o mesmo nível de potência do sinal. A antena cabo radiante encontra-se no Alfa Pendular, embora não havendo referência ao modelo usado. Sobre este tipo de equipamentos há que dizer que se trata essencialmente de um cabo coaxial que através de uma série de fendas no condutor radia energia electromagnética, funcionando simultaneamente como uma linha de transmissão e simultaneamente como uma antena. Nos catálogos vêm habitualmente referidas as perdas longitudinais e a quantidade de radiação é contabilizada pela diferença entre a potência que é transmitida ao cabo e a recebida por um dipolo de $\lambda/2$ a uma distância típica de 2 m do cabo onde não se encontra contabilizada as perdas longitudinais. Esta diferença é habitualmente bastante elevada podendo ter valores da ordem dos 65 e 60 dB à frequência de 900 e 1 800 MHz respectivamente. A grande diferença reside nas perdas longitudinais onde se encontram valores típicos da ordem dos 100 e 230 dB/km à frequência de 900 e 1 800 MHz respectivamente, [RFSy99] e [KaEu00].

Os cabos coaxiais são necessários para fazer as ligações entre o repetidor e ambas as antenas (exterior e interior). Existem várias espessuras para os cabos, influenciando a atenuação longitudinal e a potência máxima que podem suportar. Além disso, uma grande espessura limita bastante o grau de flexibilidade, pelo que numa aplicação onde seja necessário manobrar o cabo não é habitual encontrar espessuras superiores a $\frac{1}{2}$ polegada. Neste tipo de cabos encontram-se normalmente atenuações de cerca de 7 dB/100m, potências máximas típicas de 1 kW, e graus de flexibilidades que permitem curvas com raio típico de 10 cm, [KaEu00] e [RFSy99].

3.2 Medidas para a caracterização dos Comboios

3.2.1 Descrição dos ambientes e dos processos de medida

Foram realizadas uma série de medidas de perdas por penetração na banda dos 900 MHz e 1 800 MHz, em dois tipos diferentes de comboios (Alfa Pendular e Inter Cidades), em dois ambientes diferentes (urbano e suburbano), e para várias posições dos veículos em relação às EBs. Estas medidas contribuem para definir a solução de cobertura do interior das carruagens a empregar.

Paralelamente às medidas das perdas por penetração nas carruagens, foram efectuadas medidas nas cabines do Alfa Pendular e das locomotivas dos Inter Cidades. Estas medidas de perdas por penetração nas cabines servem para complementar as medidas de cobertura a realizar ao longo da linha férrea.

No que diz respeito ao Alfa Pendular, uma vez que já possui uma solução de repetidor, foram analisados os equipamentos, através de medidas, por forma a desvendar quais as suas características, nomeadamente para perceber quais as perdas do cabo radiante instalado nas carruagens.

A escolha do Alfa Pendular e o Inter Cidades prende-se com facto de que estes dois veículos conseguem caracterizar praticamente todos os modelos existentes: os primeiros, por serem mais modernos, representam toda uma tendência futura para o design destes transportes; os segundos correspondem a um modelo mais antigo que circula na grande maioria nas linhas férreas portuguesas. Ambos os veículos apresentam um revestimento metálico e janelas de vidro de grande espessura, enquanto o interior destes varia muito, podendo os materiais ir desde madeira a PVC; para uma melhor visualização dos mesmos,

encontra-se no **Anexo I** uma descrição pormenorizada. Como se pode notar no anexo, as carruagens do Alfa Pendular apresentam janelas mais pequenas que as do Inter Cidades pelo que se espera maiores perdas. Também se pode verificar no catálogo do Alfa Pendular que é mencionado a existência do repetidor GSM Kathrein 700686 [KaRP97]. As medidas para a obtenção das perdas por penetração nas carruagens aqui apresentadas foram obviamente realizadas com o repetidor desligado.

Para a obtenção dos valores das perdas por penetração era necessário encontrar locais abertos onde os veículos pudessem estar isolados, evitando-se assim reflexões ou obstruções do sinal não desejadas que impeçam a obtenção de valores mais realistas possíveis. Além disso, era conveniente que o ambiente circundante não variasse durante a realização dos testes, uma vez que importa comparar medidas obtidas em alturas diferentes. Infelizmente os locais indicados pela CP para a realização dos testes nem sempre satisfizeram as necessidades anteriormente mencionadas, devido à impossibilidade de isolar os locais do inevitável tráfego ferroviário. No **Anexo J** pode-se encontrar os locais onde os testes se realizaram: em Lisboa na estação ferroviária de S^{ta} Apolónia, e no Porto na estação ferroviária de Contumil. Em Lisboa o ambiente que envolvia os testes era claramente urbano, e só foi possível conseguir isolar os veículos alvo dos circundantes cerca de 10 metros no pior dos casos; no Porto o ambiente era suburbano, e aqui foi possível obter o veículo alvo afastado dos restantes em cerca de 20 metros. As EB que servem estes locais encontram-se também posicionadas no mapa em anexo. Note-se que em Lisboa, devido à presença do rio Tejo, nenhuma das EBs tem sectores a apontar para a linha férrea, uma vez que o sinal poderia muito facilmente chegar à outra margem do rio e aí interferir com outras EBs; por isso, todo o sinal aí existente é provavelmente proveniente de reflexões estando assim fortemente sujeito a desvanecimento rápido.

As medidas foram realizadas utilizando a ferramenta TEMS, desenvolvida pela Ericsson Erisoft, constituída por um TM modelo SH888 para a banda de GSM900 e GSM1800 e por um computador portátil. A ferramenta permite forçar o TM a efectuar um varrimento de todas as frequências do GSM900 e GSM1800 em separado ou em ambas no mesmo teste; sendo seleccionadas periodicamente as 7 frequências com maior nível de potência do sinal. A ferramenta permite fazer e armazenar os testes com o TM em modo de chamada ou **idle**. Apresenta-se de seguida os procedimentos para a obtenção das medidas, começando por descrever o procedimento para as carruagens e posteriormente para as cabines.

O método de medida escolhido foi o de efectuar medidas longitudinalmente no interior de uma carruagem e posteriormente efectua-las no exterior. No interior percorreu-se o corredor central e no exterior foram realizadas medidas dum lado e de outro a uma distância de cerca de 2 metros da carruagem paralelamente à linha percorrida interiormente. O TM foi transportado, no interior, a meio braço de distância do corpo e a cerca de 1 m de altura do chão da carruagem (altura essa que equivale à posição da cabeça dos bancos do comboio); enquanto no exterior a altura foi cerca de 0.5 m abaixo das janelas, devido à baixa altura das plataformas do cais.

Foram realizadas medidas com o TM em chamada e em *idle* na banda GSM900 e em *dualband*. Em cada modo foi realizado várias vezes o mesmo percurso de um lado para o outro a uma velocidade constante de forma a adquirir um vasto número de medidas de forma equiespaçada, no entanto, as medidas foram realizadas por dois grupos de pessoas podendo obviamente cada um imprimir uma velocidade diferente. Estas diferenças não são identificáveis nos resultados, e além do mais as diferenças de velocidade acabaram por corresponder a que um grupo percorre-se o percurso mais ou menos vezes que o outro, por forma a que o número de medidas tiradas fosse aproximadamente o mesmo.

As medidas no interior das cabines foram realizadas com o TM na posição onde este estaria colocado para as medidas de cobertura da linha férrea, isto é, junto à janela dianteira.

No caso do Alfa Pendular esta janela é de grandes dimensões, mas o mesmo não acontece com a janela da locomotiva que puxa o Inter Cidades (Anexo I), pelo que será de esperar maiores perdas por penetração nesta última cabine. No que diz respeito às medidas no exterior, para o Inter Cidades, foram recolhidos dados em duas posições do TM: a 1 m mesmo em frente da janela e por cima do tejadilho do comboio. Para o Alfa Pendular foram feitas as medidas em dois locais: no primeiro local as medidas no exterior foram feitas a 2 m em frente à janela dianteira da cabine, e no segundo local o comboio deslocou-se após as medidas de interior pelo que as medidas de exterior foram realizadas no mesmo local mas sem o comboio na zona. O motivo dos processos de medida não serem idênticos para os dois comboios prende-se mais uma vez com o facto de que estes veículos se encontrarem em serviço, e terem também eles características diferentes. No entanto, pretende-se em ambos os casos obter uma medida exterior em que o comboio obstruísse o sinal proveniente de trás deste, e outra medida em que o TM esteja completamente desobstruído.

Resta somente salientar que as medidas realizadas para o Alfa Pendular foram feitas com o repetidor ligado. Este factor era importante uma vez que se pretende complementar com estas medidas as medidas de cobertura da linha férrea. No entanto, é pouco provável que o sinal proveniente do repetidor atinja a cabine com valores significativos, uma vez que esta é isolada do resto da carruagem, coberta por cabo radiante, através de duas portas metálicas com pequenas janelas de vidro circulares de cerca de 10 cm de diâmetro.

3.2.2 Análise das medidas

Os resultados das medidas foram posteriormente processados de forma individual para o nível de potência do sinal de cada frequência armazenada. Nesta análise pretende-se estimar o valor das perdas por penetração nos veículos, VPL , através de (2.33), em que foram introduzidos como parâmetros, quer os valores médios da potência dos sinais medidos, $VPL(\bar{P})$, quer os valores de potência acima dos quais 50% das amostras se encontravam, $VPL(P^{50\%})$. Estes últimos foram obtidos através de gráficos das funções de distribuição, sendo por isso os valores medianos. Apresenta-se de seguida, a título de exemplo, um gráfico onde se descreve a potência dos sinais medidos no interior e exterior do Alfa Pendular na banda dos 900 MHz.

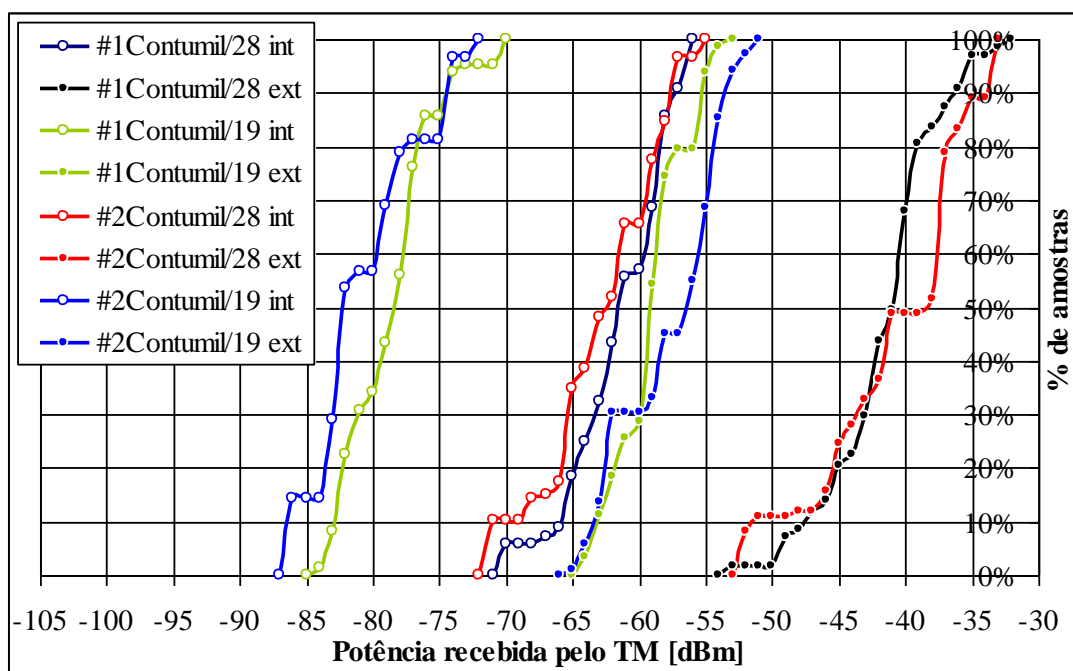


Figura 3.1 - Testes de VPL do Alfa Pendular a 900 MHz no Porto em *idle*.

Os restantes gráficos encontram-se no Anexo K, podendo ser consultados paralelamente às tabelas que contêm os resultados obtidos para cada um dos diferentes locais e para as diferentes bandas de frequências, (da Tab. K.1 à Tab. K.5, e da Tab. K.6 à Tab. K.9 encontram-se os resultados referentes aos testes realizados no Porto e Lisboa, respectivamente).

Em cada uma das tabelas pode-se encontrar o valor médio da potência dos sinais medidos interiormente, $\overline{P_{int}}$, e exteriormente à carruagem, $\overline{P_{ext}}$, e ainda o desvio padrão, σ ; encontra-se também os valores medianos para o interior, $P_{int}^{50\%}$, e exterior da carruagem, $P_{ext}^{50\%}$. Note-se que em alguns casos para a mesma frequência e EB são apresentados dois testes, na mesma tabela, realizados em ocasiões diferentes.

Começando por analisar os resultados obtidos no Porto para o Alfa Pendular a 900 MHz onde o TM se encontra em modo *idle*, pode-se verificar que a diferença entre os valores de potência dos sinais medidos, no interior da carruagem do alfa pendular e no exterior do lado da EB, são bastante elevados, obtendo-se assim para $VPL(\overline{P})$ um valor médio de 20.6 dB e para $VPL(P^{50\%})$ de 21.0 dB.

Com o TM em modo chamada pode-se confirmar o resultado anterior. Como se pode verificar, os valores de potência do sinal para a frequência usada pelo TM para efectuar a chamada (Contumil/28) são menores do que os valores medidos em *idle*, o que se deve ao algoritmo de controlo de potência já anteriormente abordado. Assim, ignorando estas medidas, chega-se a um valor médio para $VPL(\overline{P})$ de 18.9 dB e para $VPL(P^{50\%})$ de 19.4 dB, muito semelhantes aos anteriores. No entanto as mesmas medidas efectuadas do lado exterior da carruagem oposto à EB não podem ser levados em conta, uma vez que não reflectem correctamente as perdas por penetração no veículo, o que se deve ao facto de o sinal sofrer uma atenuação adicional correspondente a transpor a carruagem.

Para a banda GSM1800 a escassez de EBs a emitir nestas frequências levou à fraca obtenção de amostras, pelo que só se obteve resultados sobre uma frequência. Além disso, o número de amostras foi bastante reduzido e o desvio padrão muito elevado como se pode

verificar pelo gráfico da função de distribuição. Assim, pode-se concluir que os valores das perdas por penetração no Alfa Pendular são superiores na banda GSM1800 tendo como valor provável cerca de 28 dB. Infelizmente na altura em que se realizou os testes era desconhecida a posição das EBs, pelo que novamente se obtém resultados para o lado oposto à EB a confirmar novamente a existência de uma atenuação suplementar que impede aferir correctamente resultados reais.

Os testes realizados em Lisboa incidiram na grande maioria no comboio Inter Cidades, uma vez que os comboios Alfa Pendular ficam pouco tempo parados entre viagens nesta estação ferroviária. Além disso, o Alfa Pendular durante esta pausa não é desligado, uma vez que se encontra em limpeza e manutenção, o que inviabiliza os testes a 900 MHz devido ao funcionamento do REP; por outro lado, no local onde foram efectuados os testes em Lisboa só existia uma EB a operar na banda GSM1800. Comparando o resultado das perdas por penetração com o resultado obtido no Porto verifica-se que é inferior, mas continuando acima dos valores obtidos na banda GSM900.

No que diz respeito ao Inter Cidades, as medidas sofrem muito com o facto anteriormente mencionado das fracas condições de estabilidade que o ambiente envolvente mantinha, sendo muitas das amostras rejeitadas por evidentes anomalias provocadas pelo tráfego ferroviário. Assim chega-se a um valor médio de $VPL(\bar{P})$ de 9.7 dB e para $VPL(P^{50\%})$ de 10.3 dB, valores estes inferiores aos do Alfa Pendular como era de esperar uma vez que as janelas do Inter Cidades são maiores. Pode verificar-se que o sinal proveniente da EB de S^{ta} Apolónia medido no exterior da carruagem do lado do rio Tejo apresenta valores de potência ligeiramente inferiores aos do lado oposto ao rio, o que se deve provavelmente à preocupação que existe em não orientar sectores para o rio devido à interferência que se poderia provocar na outra margem.

Para a banda GSM1800 pode-se verificar novamente a existência de uma ligeira diferença entre os valores obtidos de um lado e de outro da carruagem, pelo que se tende a estimar o valor das perdas por penetração nos valores obtidos através das medidas feitas no lado oposto ao rio. Assim tem-se um valor de $VPL(\bar{P})$ de cerca 13.3 dB e para $VPL(P^{50\%})$ cerca de 12.0 dB.

Note-se que os valores apontados anteriormente para as perdas por penetração não são mais do que estimativas feitas através de um muito reduzido número de amostras. Para a obtenção de valores mais realistas seria necessário aumentar o número de resultados de modo a que se obtenha um valor com alguma credibilidade estatística. Infelizmente o número de amostras é escassa sofrendo assim facilmente com alguns resultados inesperados como é o caso de se verificarem situações em que o sinal medido no interior é superior a alguns valores medidos no exterior, situação esta observável em alguns gráficos em anexo. Como se pode verificar pelos resultados o conhecimento prévio da posição da EB e a orientação dos seus sectores é de extrema relevância. Além disso o ambiente onde se efectuam as medidas influencia bastante os resultados, sendo de esperar que ambientes urbanos onde não se obtém linha de vista com a EB seja mais complicado aferir o valor das perdas por penetração.

Para as perdas de penetração nas cabines começa-se por apresentar os resultados para o Alfa Pendular seguindo-se a locomotiva do Inter Cidades. De forma idêntica, para as cabines também as tabelas com os resultados obtidos e os gráficos das funções distribuição encontram-se no **Anexo L**.

Para o Alfa Pendular foram realizadas duas medidas. No que diz respeito aos resultados das medidas onde no exterior o comboio causava alguma obstrução, tem-se um valor médio para $VPL(\bar{P})$ de cerca 3.8 dB, com um desvio padrão de 5.2 dB, e para $VPL(P^{50\%})$ de cerca de 4.1 dB, com um desvio padrão de 5.7 dB. Sem obstrução por parte do comboio, os valores das perdas por penetração aumentam como seria de esperar, tendo-se assim um valor para

$VPL(\bar{P})$ em média de cerca 4.5 dB, com um desvio padrão de 3.0 dB, e para $VPL(P^{50\%})$ de cerca de 4.3 dB, com um desvio padrão de 2.7 dB. Note-se que neste segundo caso o desvio padrão é menor, uma vez que no caso anterior a diferença entre sinais obstruídos e sem obstrução é evidente.

Para a locomotiva do Inter Cidades verificou-se o mesmo fenómeno que no Alfa Pendular. Assim, para as medidas onde o comboio poderia provocar obstrução surgem valores para $VPL(\bar{P})$ de cerca 7.1 dB, com um desvio padrão de 6.1 dB, e para $VPL(P^{50\%})$ de cerca de 6.4 dB, com um desvio padrão de 6.8 dB. Para as medidas feitas acima do tejadilho, onde o sinal estaria desimpedido, surgem valores de $VPL(\bar{P})$ de cerca 10.5 dB, com um desvio padrão de 6.6 dB, e para $VPL(P^{50\%})$ de cerca de 10.3 dB, com um desvio padrão de 6.5 dB. Na Tab. 3.1 apresenta-se um resumo global dos valores de VPL atrás referidos.

			$VPL(\bar{P})$ [dB]	$VPL(P^{50\%})$ [dB]
GSM900	Alfa Pendular	carruagem	20.6	21.0
		locomotiva	4.5	4.3
	Inter Cidades	carruagem	9.7	10.3
		locomotiva	10.5	10.3
GSM1800	Alfa Pendular	carruagem	28.0	-
		locomotiva	-	-
	Inter Cidades	carruagem	13.3	12.0
		locomotiva	-	-

Tabela 3.1 – Valores globais de VPL.

No que diz respeito à caracterização dos equipamentos instalados actualmente no Alfa Pendular, é importante perceber quais os ganhos do repetidor na ligação ascendente e descendente e quais as perdas introduzidas pelo cabo radiante. No que diz respeito aos ganhos do repetidor o valor encontrado foi de 48 dB para qualquer das ligações, que não surge por medidas, mas sim por observação de qual a selecção para os ganhos de um dos repetidores. Para caracterizar o cabo recorreu-se às medidas efectuadas anteriormente, para a banda de 900 MHz em chamada, **Tab. K.2**, onde se acrescenta resultados obtidos no interior das carruagens com o repetidor ligado. No **Anexo M** encontra-se os níveis de potência do sinal medidos no interior da carruagem, com o repetidor ligado, juntamente com os valores anteriormente medidos no exterior adicionados do ganho do repetidor (48 dB). Desta forma é possível obter o valor das perdas no cabo radiante para uma distância de 1 m deste, L_{cabo1m} .

Fazendo a média dos valores obtidos através dos vários sinais pode-se considerar que L_{cabo1m} do cabo radiante que se encontra na carruagem do Alfa Pendular é cerca de 60 dB. Note-se que se a este valor se retirar 31.5 dB de atenuação por propagação em espaço livre de 1 m, a 900 MHz, chega-se a um valor de perdas de radiação do cabo de 28.5 dB. A este valor poder-se-ia retirar ainda as perdas longitudinais, no entanto estas são habitualmente desprezáveis face às perdas transversais.

Comparando ainda os valores de potência medidos no interior com e sem o repetidor ligado, pode verificar-se que com repetidor o sinal é mais forte e a diferença em média é cerca de 7.0 dB com desvio padrão de 2.3 dB. Esta diferença é facilmente visualizada em anexo através da figura que aí se encontra representando as funções de distribuição das medidas em causa.

3.3 Ruído

A potência de ruído disponível aos terminais da antena é dada pela soma da componente externa com a componente interna. Na Secção 2.1.4 encontram-se os valores de ruído externo N e a temperatura de ruído externa que envolve a antena T_a .

A potência de ruído interno é também determinada por (2.5) onde T_a toma agora o valor da temperatura de ruído interna, T_{Ai} , devida às perdas próprias da antena dada por:

$$T_{Ai} = (1 - \eta)T_0 \quad (3.1)$$

onde η representa o rendimento da antena e T_0 a temperatura ambiente. Considerando que as antenas apresentam normalmente um rendimento de 98% obtém-se $T_{Ai} = 6$ K e uma potência de ruído interna $N_i = -138$ dBm. Trata-se de um valor desprezável face ao ruído externo nas zonas comerciais, mas que deve ser levado em conta para zonas rurais e para valores baixos de ganho da antena.

Na Tab. 3.2 encontra-se o valor da temperatura equivalente de ruído externo, T_{Ae} , para um ganho da antena de 0 dBi. Além disso, encontra-se também a temperatura equivalente de ruído aos terminais da antena, T_A , determinada por (F.2), e o respectivo valor de potência de ruído, N_A .

	Zonas Comerciais				Zonas Rurais			
	T_{Ae} [K]	N_{Ae} [dBm]	T_A [K]	N_A [dBm]	T_{Ae} [K]	N_{Ae} [dBm]	T_A [K]	N_A [dBm]
GSM900	100	-125.6	106	-125.3	10	-135.6	16	-133.5
GSM1800	25	-131.6	31	-130.7	2	-142.6	8	-136.6

Tabela 3.2 – Ruído Total aos Terminais da antena.

Pode-se verificar que o ruído gerado internamente tem uma contribuição significativa, principalmente nas zonas rurais e no GSM1800 em que o seu valor é consideravelmente maior do que o ruído externo.

Seguidamente analisa-se também o ruído introduzido ao nível dos equipamentos. Quando o repetidor está em funcionamento, este é ligado às antenas através de cabos como já foi referido, Fig. F.1. Assim, tem-se uma cadeia de quadripolos, sendo importante calcular o ganho global, G_{cad} , e o factor de ruído global, F_{cad} , desta associação em cadeia.

Considere-se a situação, Fig. F.1, em que o Cabo 1 que liga o REP à Antena 1 e o Cabo 2 que liga o REP à Antena 2 têm um comprimento de 4 m e 5 m, respectivamente, e ainda que ambos os cabos possuem um coeficiente de perdas, α , de 7 dB/100 m. São ainda efectuados os cálculos para três valores de ganho do repetidor, G_{rep} , de 85, 55 e 30 dB, a que corresponde um factor de ruído, F_{rep} , de 6, 8 e 8 dB, respectivamente. Por hipótese, todos os componentes do sistema encontram-se à temperatura ambiente, T_0 .

Através da expressão (F.6) podemos calcular o factor de ruído da cadeia, F_{cad} . Na tabela seguinte encontram-se esses valores assim como o novo ganho da cadeia.

	G_{cad} [dB]	F_{cad} [dB]
$G_{rep}=85$ dB $F_{rep}=6$ dB	84.4	6.3
$G_{rep}=55$ dB $F_{rep}=8$ dB	54.4	8.3
$G_{rep}=30$ dB $F_{rep}=8$ dB	29.4	8.3

Tabela 3.3 – Associação em Cadeia.

Pode-se concluir que para cabos de comprimentos pequenos os valores do ganho da cadeia, assim como do factor de ruído, não diferem acentuadamente em comparação com os valores do repetidor. Assim, a atenuação e o ruído introduzido pelos cabos podem ser desprezados, tendo em conta nos cálculos a efectuar só o ganho e factor de ruído do repetidor.

3.4 Atenuação por Propagação

Para o cálculo da atenuação de propagação, entre a EB e o REP, é usado o modelo do COST 231-Walfisch-Ikegami [COST91] válido para distâncias compreendidas no intervalo [0.02, 5] km e o modelo de Okumura-Hata [Hata80] para distâncias em [1, 20] km.

No modelo de Okumura-Hata para o GSM900 usa-se (G.1) e para o GSM1800 usa-se (G.4), para cenários caracterizados por centros urbanos e suburbanos. Admite-se um caso típico com $h_b=23$ m, $h_{ob}=45$ m, $h_{om}=30$ m. A altura considerada para o receptor móvel é de $h_m=1.8$ m no caso de se estar a estimar atenuação entre a EB e o TM, e de $h_m=3.6$ m no caso de se estar a estimar a atenuação entre a EB e o REP, uma vez que a antena exterior deste se encontra no topo das carruagem. No Anexo N, Fig. N.1 representa-se para este modelo a atenuação de propagação em função da distância, para as duas bandas do GSM e para os centros urbanos, suburbanos e rurais (áreas quase abertas). Como seria de esperar, além de a atenuação por propagação ser inferior para o GSM900 relativamente ao GSM1800, também se verifica que para a mesma distância a atenuação aumenta quando se progride de ambiente rural para urbano.

No modelo do COST 231 considera-se não haver linha de vista entre o REP e a EB tomando com a orientação das ruas o pior caso, ou seja 90° . Admite-se os casos típicos de centros urbanos e suburbanos, com a antena da EB acima do topo dos edifícios e também se considera $h_b=20$ m, $H_B=12$ m, $w_B=50$ m, $w_s=15$ m, $\Phi=90^\circ$ e $h_m=1.8$ m. No entanto, apesar de estar fora do limite de validade deste modelo, utiliza-se por vezes a altura do receptor móvel de 3.6 m pela razão mencionada anteriormente. Tal como o modelo anterior, representa-se no Anexo N a atenuação por propagação em função da distância nas mesmas condições já referidas. Os resultados são semelhantes aos do modelo anterior, mas este modelo à frequência de 900 MHz não evidencia grandes diferenças entre ambientes urbanos e suburbanos.

Também neste anexo se representa o andamento da atenuação de espaço livre para ambas as bandas de frequências do GSM e para distâncias entre [1,50] m. Como seria de esperar a atenuação de espaço livre é menor que qualquer uma das situações criadas nos modelos anteriores.

3.5 Distâncias Máxima e Mínima

Importa agora estudar a situação específica de aplicar o repetidor às carruagens de um comboio. Este estudo pretende determinar quais as distâncias limites entre as quais o comboio se pode encontrar relativamente às EBs, beneficiando do uso do repetidor. Interessa também abordar diversas situações possíveis tais como: a variação do ganho do repetidor e respectivo factor de ruído; as diferentes causas de ruído consoante o cenário; e ainda o funcionamento nas duas bandas de frequência do GSM.

Inicialmente apresenta-se uma descrição dos cálculos efectuados para a obtenção dos valores de potência envolvidos. Desta forma pretende-se caracterizar as ligações ascendente e descendente. Além disso importa perceber qual o contributo do circuito de ajuste automático

de potência e de como o controlo de potência entre EB e TM é afectado pela introdução do REP. Por fim é avaliado o equilíbrio da ligação.

3.5.1 Percurso Descendente

Considere-se a situação para o canal descendente, Fig. 3.2, onde se tem uma EB com um EIRP de 57 dBm e um repetidor a operar ao ganho máximo de 85 dB com um factor de ruído, F_{rep} , de 6 dB. Escolhe-se para o exterior da carruagem uma antena omnidireccional com um ganho de $G_{ext}=0$ dBi, e para a antena interior à carruagem opta-se por um cabo radiante com as seguintes características: perdas longitudinais de 0.097 dB/m para a banda GSM900 e de 0.233 dB/m para a banda GSM1800; perdas transversais de $L_{cabo2m}=63$ dB para a banda GSM900 e $L_{cabo2m}=54$ dB para a banda GSM1800, a uma distância de 2 m do cabo. Considera-se que os TMs se encontram a aproximadamente 1 m relativamente ao cabo radiante e por isso a atenuação do cabo até ao TM, L_{cabo1m} , será de 57 e 48 dB para o GSM900 e GSM1800, respectivamente, uma vez que é descontado a diferença entre as duas distâncias através da equação de atenuação por propagação em espaço livre. Um cabo com 16 m de comprimento, o suficiente para cobrir a carruagem na zona dos passageiros, tem para perdas longitudinais máximas 1.6 dB e 3.7 dB para a banda GSM900 e GSM1800 respectivamente. São sem dúvida valores muito baixos comparados com as perdas transversais. No entanto, são contribuições a acrescentar juntamente com as perdas do cabo coaxial que une o cabo radiante ao REP. Além disso, existem por certo desadaptações nas ligações dos cabos prevendo-se assim um valor final da atenuação entre o REP e o TM que poderá ser arredondado para 60 dB e 53 dB para a banda GSM900 e GSM1800 respectivamente. Note-se que o valor de 60 dB, para a banda GSM900, vem em conformidade com o resultado das medidas efectuadas para o cabo radiante instalado no Alfa Pendular.

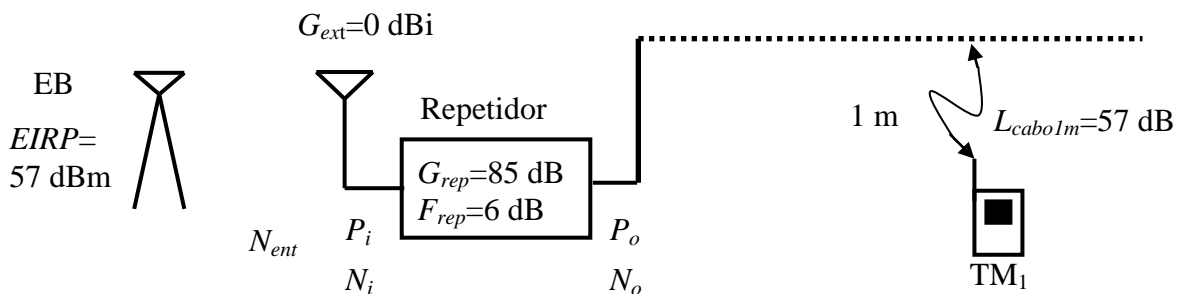


Figura 3.2 – Aplicação no Canal Descendente.

Como já foi referido na Secção 3.3, a potência de ruído aos terminais da antena exterior do REP, Fig. 3.2, para a banda GSM900 é de $N_i = -125.3$ dBm (ruído produzido pelo homem em zona comercial adicionado do ruído interno da antena). A potência de ruído, N_o , à saída do REP, Fig.3.2, é dada por (2.11). Obtém-se assim $N_o = -34.3$ dBm. Devido a esta potência de ruído deve-se garantir que a potência de sinal à saída, P_o , seja acrescida de uma margem de segurança. Essa margem, $(C/N)_o$, poderá ser a margem mínima C/N acrescida de 2 dB por segurança tomando o valor de 10 dB. Assim deverá ter-se uma potência de sinal de saída no mínimo $P_o = -24.3$ dBm de forma a garantir que não haja influência de ruído.

A potência de sinal à entrada, P_i , do REP, Fig. 3.2, vem dada pela potência à saída, P_o , subtraída do ganho do REP. Obtém-se assim, $P_i = -109.3$ dBm. Note-se que existe um aumento da relação sinal/ruído na entrada do REP. Esta relação, $(C/N)_i$, é agora de 16 dB devido ao factor de ruído do REP.

Uma vez que se obteve o valor da potência mínima que se deve ter na entrada do REP, P_i , e que é conhecida a $EIRP$ da EB pode-se obter a atenuação de propagação entre a EB e o REP. Este valor, $L_{p_{EB-REP}}$, é então de 166.3 dB. A partir desta atenuação estima-se a distância máxima a que o REP se pode encontrar da EB, para que a ligação não fique deteriorada pelo ruído, Tab. 3.4. Essa estimativa é feita para os diferentes modelos de propagação estudados na Secção 3.2.

$L_{p_{EB-REP}}=166.3$ dB	COST231-WI		Okumura-Hata		
	Urbano	Suburbano	Urbano	Suburbano	Rural
d [km]	16.1	16.1	22.4	42.5	107.4

Tabela 3.4 – Distância máxima que o REP pode estar da EB.

É de referir que os valores das distâncias para os modelo COST231-WI e modelo de OH estão fora da validade para qualquer um dos ambientes. Considerando isto, pode-se estimar que a distância máxima a que o comboio se pode encontrar da EB é da ordem dos 16-20 km para ambiente urbano, e distâncias superiores para os restantes ambientes. É de referir que em ambientes urbanos e suburbanos raramente existem células com dimensões tão elevadas como as obtidas anteriormente. Assim o ruído não será muito problemático nestes casos.

Relativamente ao TM, considera-se que a atenuação de propagação entre o REP e este, $L_{p_{REP-TM}}$ é de 60 dB (GSM900), como já foi referido. Assim, a potência de sinal que chega ao TM é -84.3 dBm. Esta potência é a potência mínima de recepção acima da qual o TM deve operar para que a sua ligação não fique deteriorada pelo ruído. É de notar que este valor encontra-se muito acima do nível de sensibilidade do TM.

Uma outra limitação introduzida pelo REP, já referida no Capítulo 2, é a potência máxima de saída ou potência de saturação. Estas potências variam de REP para REP, e têm valores diferentes para os canais ascendente e descendente. Um valor típico para esta potência de saturação é, para o canal descendente, de $P_{sat}=14$ dBm no caso em que 4 portadoras estão a ser amplificadas. A potência máxima que chega ao TM é de -46 dBm e, para tal acontecer a potência de entrada no REP teria de ser $P_i=-71$ dBm, que é o máximo valor admissível na entrada para que o REP (amplificador) não sature. Pode-se mais uma vez calcular a atenuação de propagação entre a EB e o REP e assim estimar a distância mínima a que o REP pode estar da EB para que este não sature, Tab. 3.5. São aqui também usados os modelos de propagação COST231-WI e OH.

$L_{p_{EB-REP}}= 128$ dB	COST231-WI		Okumura-Hata		
	Urbano	Suburbano	Urbano	Suburbano	Rural
d [km]	1.6	1.6	1.8	3.4	8.4

Tabela 3.5 - Distância mínima que o REP pode estar da EB.

Note-se que os valores obtidos pelo modelo OH encontram-se fora da validade para os ambientes urbanos e suburbanos. No entanto, verifica-se que a distância mínima que o REP pode estar da EB toma valores muito elevados tornando-se uma grande limitação uma vez que na prática seria difícil assegurar tais distâncias.

Completa-se agora o estudo para diversas situações possíveis começando por apresentar os cálculos na banda de frequências dos 900 MHz e posteriormente passando aos 1800 MHz.

Apresenta-se os valores de potência de ruído nos vários pontos da ligação, Tab. 3.6, ilustrada anteriormente pela Fig 3.2. Esta tabela contempla o ruído, já apresentado na Secção 3.3, produzido em zonas comerciais e em zonas rurais. Além disso, de forma a contemplar toda a gama de amplificação dos REPs escolhidos, interessa analisar alguns valores de ganho

do REP (30, 55 e 85 dB). Esta tabela contém ainda o valor da potência de ruído, proveniente do REP, que chega ao TM através do cabo radiante, N_{rTM} . Note-se que, à semelhança do que acontece com os cabos coaxiais, também os cabos radiantes, a curtas distâncias, introduzem valores de ruído desprezáveis de forma que também não é contabilizada a sua contribuição.

	$f=900$ MHz				$f=1800$ MHz			
	N_{ent} [dBm]	N_i [dBm]	N_o [dBm]	N_{rTM} [dBm]	N_{ent} [dBm]	N_i [dBm]	N_o [dBm]	N_{rTM} [dBm]
$G_{rep}=85$ dB	-125.6	-125.3	-34.3	-94.3	-131.6	-130.7	-39.7	-92.7
$F_{rep}=6$ dB	-135.6	-133.5	-42.5	-102.5	-142.6	-136.6	-45.6	-98.6
$G_{rep}=55$ dB	-125.6	-125.3	-62.3	-122.3	-131.6	-130.7	-67.7	-120.7
$F_{rep}=8$ dB	-135.6	-133.5	-70.5	-130.5	-142.6	-136.6	-73.6	-126.6
$G_{rep}=30$ dB	-125.6	-125.3	-87.3	-147.3	-131.6	-130.7	-92.7	-145.7
$F_{rep}=8$ dB	-135.6	-133.5	-95.5	-155.3	-142.6	-136.6	-98.6	-151.6

Tabela 3.6 – Potências de ruído no percurso descendente.

As Tab. 3.7 e Tab. 3.8 por sua vez apresentam os valores da potência do sinal mínima para que não haja deterioração do sinal por parte do ruído.

$f=900$ MHz	N_i [dBm]	P_i [dBm]	P_o [dBm]	P_{rTM} [dBm]	P_o/N_o [dB]	P_i/N_i [dB]	$L_{PEB-REP}$ [dB]
$G_{rep}=85$ dB	-125.3	-109.3	-24.3	-84.3	10	16	166.3
$F_{rep}=6$ dB	-133.5	-117.5	-32.5	-92.5	10	16	174.5
$G_{rep}=55$ dB	-125.3	-107.3	-52.3	-112.3	10	18	164.3
$F_{rep}=8$ dB	-133.5	-115.5	-60.5	-120.5	10	18	172.5
$G_{rep}=30$ dB	-125.3	-107.3	-77.3	-137.3	10	18	164.3
$F_{rep}=8$ dB	-133.5	-115.5	-85.5	-145.3	10	18	172.5

Tabela 3.7 – Potências mínimas do sinal no percurso descendente para banda dos 900 MHz.

$f=1800$ MHz	N_i [dBm]	P_i [dBm]	P_o [dBm]	P_{rTM} [dBm]	P_o/N_o [dB]	P_i/N_i [dB]	$L_{PEB-REP}$ [dB]
$G_{rep}=85$ dB	-130.7	-114.7	-29.7	-82.7	10	16	171.7
$F_{rep}=6$ dB	-136.6	-120.6	-35.6	-88.6	10	16	177.6
$G_{rep}=55$ dB	-130.7	-112.7	-57.7	-110.7	10	18	169.7
$F_{rep}=8$ dB	-136.6	-118.6	-63.6	-116.6	10	18	175.6
$G_{rep}=30$ dB	-130.7	-112.7	-82.7	-135.7	10	18	169.7
$F_{rep}=8$ dB	-136.6	-118.6	-88.6	-141.6	10	18	175.6

Tabela 3.8 - Potências mínimas do sinal no percurso descendente para banda dos 1800 MHz.

Como se verifica nas tabelas anteriores a relação sinal ruído à entrada, P_i/N_i , tem de ser maior no caso do REP estar a operar com o ganho mínimo, uma vez que o factor de ruído do equipamento nesta situação é maior do que quando se opera com o ganho máximo. Os valores de atenuação de propagação obtidos provêm do valor de potência mínima que se pode ter na entrada. Estes valores de atenuação de propagação traduzem-se em distâncias máximas entre as quais o REP se pode afastar das EBs.

Ao analisar as tabelas anteriores pode-se chegar à conclusão que o REP necessita de um nível de potência de entrada, no pior dos casos, superior a -107.3 dBm. Neste momento interessa introduzir uma característica dos REPs que ainda não foi mencionada: o nível de

sensibilidade destes equipamentos tem um valor típico é de -105 dBm. Visto que, todos os valores de potência mínima exigida, para que não exista degradação do sinal por parte do ruído, se encontram abaixo deste valor pode-se futuramente definir o nível de sensibilidade do REP como o valor limite. Assim, faz sentido dizer que a atenuação por propagação máxima entre a EB e o REP, $L_{P_{EB-REP}}$, aceitável é de 162 dB, ficando assim a distância máxima entre ambos definida para todos as situações de ganho do REP na seguinte Tab. 3.9.

$L_{P_{EB-REP}}=162$ dB	COST231-WI		Okumura-Hata		
	Urbano	Suburbano	Urbano	Suburbano	Rural
d [km] (GSM900)	12.3	12.3	16.9	32.7	70.7
d [km] (GSM1800)	5.8	6.7	9.2	20.4	55.3

Tabela 3.9 – Distância máxima do REP à EB.

Alguns dos valores estimados das distâncias máximas entre as EBs e o REP no percurso descendente, Tab. 3.9, são superiores ao raio máximo da célula que se consegue ter em GSM (35 km). Além disso, como já foi mencionado, o REP introduz um atraso adicional que diminui esse raio de cobertura em cerca de 2 km. Note-se também que a grande maioria dos valores obtidos pelo modelo de Okumura-Hata e a totalidade dos valores obtidos pelo modelo COST231-WI se encontram fora da validade dos modelos. Assim, pode-se considerar que no percurso descendente será pouco provável ter problemas de cobertura devido à limitação da sensibilidade do REP definida graças ao ruído, uma vez que as distâncias máximas são bastante elevadas

Apresenta-se seguidamente na Tab. 3.10 os valores da potência do sinal máxima nos vários pontos da ligação, em ambas as bandas do GSM, para que o REP não sature, tendo em conta a sua potência máxima de saída. Nesta tabela escolhe-se dois valores de potência de saída máxima do REP, P_o , uma vez que este tem de dividir a sua potência máxima de saída pelo número de portadoras em uso. Assim, os valores apresentados são de 14 dBm como potência máxima quando o REP está a amplificar 4 portadoras, e 11 dBm no caso em que se usa 8 portadoras.

	P_i [dBm]	P_o [dBm]	P_{rTM900} [dBm]	$P_{rTM1800}$ [dBm]	$L_{P_{EB-REP}}$ [dB]
$G_{rep}=85$ dB	-71	14	-46	-39	128
$F_{rep}=6$ dB	-74	11	-49	-42	131
$G_{rep}=55$ dB	-41	14	-46	-39	98
$F_{rep}=8$ dB	-44	11	-49	-42	101
$G_{rep}=30$ dB	-16	14	-46	-39	73
$F_{rep}=8$ dB	-19	11	-49	-42	76

Tabela 3.10 - Potências máximas no percurso descendente para GSM900 e GSM1800.

Como anteriormente, os valores de potência máxima do sinal que se pode ter na entrada permitem obter os valores de atenuação de propagação que se apresentam nas tabelas anteriores. Estes valores de atenuação de propagação traduzem-se em distâncias mínimas entre as quais o REP se pode aproximar das EBs, apresentados seguidamente na Tab. 3.11.

	G_{rep} [dB]	P_o [dBm]	Lp_{EB-REP} [dB]	$d_{mínima}$ [km]				
				COST231-WI		Okumura-Hata		
				Urb	Sub	Urb	Sub	Rur
$f=900$ MHz	85	14	128	1.57	1.57	1.75	3.39	8.37
	6	11	131	1.89	1.89	2.13	4.14	10.22
	55	14	98	0.25	0.25	0.24	0.46	1.14
	8	11	101	0.31	0.31	0.29	0.56	1.38
	30	14	73	0.06	0.06	0.04	0.09	0.22
	8	11	76	0.07	0.07	0.06	0.11	0.26
$f=1800$ MHz	85	14	128	0.74	0.86	0.09	2.12	5.73
	6	11	131	0.88	1.03	1.17	2.58	7.00
	55	14	98	0.12	0.14	0.13	0.29	0.78
	8	11	101	0.14	0.17	0.16	0.35	1.01
	30	14	73	0.03	0.03	0.03	0.05	0.15
	8	11	76	0.03	0.04	0.03	0.07	0.18

Tabela 3.11 - Distâncias mínimas entre a EB e o REP no percurso descendente.

Alguns dos valores estimados das distâncias mínimas entre as EBs e o REP no percurso descendente, Tab. 3.11, encontram-se abaixo do limite inferior do modelo de Okumura-Hata. Como se pode verificar na tabela, pelo facto do REP entrar em saturação mais facilmente quando amplifica um maior número de portadoras, devido à potência de saída diminuir, a distância a que o REP pode estar da EB é menor para 8 portadoras em uso. Na banda dos 900 MHz as distâncias são da ordem de 1.5, 0.25 e 0.06 km para um ambiente urbano no caso em que o REP está a operar com o ganho de 85, 55 e 30 dB; estes valores não variam muito entre os dois modelos, encontrando-se valores mais elevados para o caso do modelo Okumura-Hata para ambientes suburbanos e rurais. No que diz respeito à banda dos 1800 MHz os valores das distâncias mínimas são mais baixos. De um modo geral, em ambas as bandas, os valores podem ser problemáticos, uma vez que na realidade existe a possibilidade de a linha de comboio estar mais perto das EBs, o que implica que o REP entre em saturação; isto agrava-se para valores de ganho do REP mais elevados.

3.5.2 Percurso Ascendente

Considere-se agora a situação para o canal ascendente, Fig. 3.3, onde se tem uma EB com um nível de sensibilidade de -104 dBm, um ganho $G_{EB}=14$ dBi e o TM a emitir com a potência de emissão máxima, P_{eTM} , de 33 dBm na banda GSM900. Considere-se novamente o REP a operar ao ganho máximo de 85 dB.

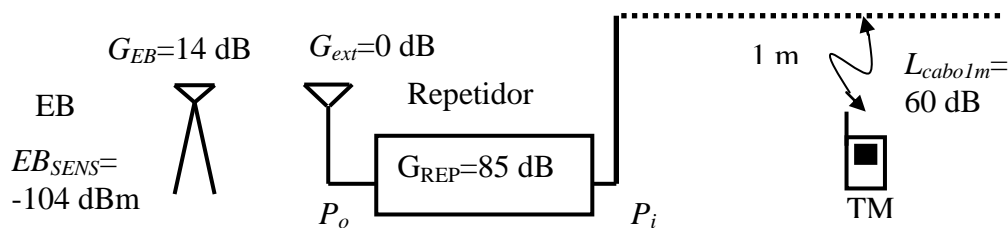


Figura 3.3 – Aplicação Canal Ascendente.

Uma vez que o TM se encontra a uma distância de 1 m, o sinal por ele emitido vai sofrer a atenuação do cabo já referida anteriormente. Assim a potência de entrada no REP, P_i , tem o valor de -27 dBm. Este valor corresponderia a valores de potência de saída do REP, P_o , de 58 dBm se o equipamento com este valor de potência à saída não saturasse. Admite-se agora que no canal ascendente a potência de saturação é $P_{sat} = 24$ dBm e 21 dBm, no caso de o REP amplificar 4 e 8 portadoras, respectivamente.

Na Tab. 3.12 apresenta-se o valor de potência do sinal emitido pelo TM obtido para o REP a operar com um ganho de 30, 55 e 85 dB. Além disso o estudo é feito para as duas bandas de frequências.

G_{rep} [dB]	$f=900$ MHz			$f=1\ 800$ MHz		
	P_{eTM} [dBm]	P_i [dBm]	P_o [dBm]	P_{eTM} [dBm]	P_i [dBm]	P_o [dBm]
85	33	-27	58	30	-23	62
55	33	-27	28	30	-23	32
30	33	-27	3	30	-23	7

Tabela 3.12 - Potência de saída do REP no percurso ascendente.

Como se verifica na Tab. 3.12., o único valor inferior aos níveis de potência de saída limite de saturação do REP, para 4 e 8 portadoras em uso, é o que se obtém no caso em que o ganho toma o valor mais baixo (30 dB). No entanto, para este ganho, a potência de saída é muito baixa o que podia por em causa a ligação se a EB estiver muito afastada. Mais uma vez se verifica que a limitação da potência máxima, que o REP impõe, provoca algumas dificuldades na execução desta aplicação. Uma possível solução reside num circuito de ajuste automático de potência (APAC – *Automatic Power Adjust Circuit*) que alguns REPs possuem. Quanto às vantagens que este circuito traz serão apresentadas na subsecção seguinte. Além deste circuito, existe sempre a possibilidade de se vir a beneficiar também do controlo de potência efectuado pelas EBs para baixar os níveis de emissão dos TMs.

Na Tab. 3.13 apresentam-se as distâncias máximas possíveis no percurso ascendente para as diversas potências máximas de saída do REP (4 e 8 portadoras). Estas distâncias são entre as EBs e o REP considerando que nesta ligação existe adicionalmente um ganho de diversidade dupla de espaço de 3 dB.

	P_o [dBm]	$L_{PEB-REP}$ [dB]	$d_{máxima}$ [km]				
			COST231		Okumura-Hata		
			Urb	Sub	Urb	Sub	Rur
$f=900$ MHz	24	145	4.4	4.4	5.4	10.5	26.0
	21	142	3.7	3.7	4.5	8.6	21.2
$f=1\ 800$ MHz	24	145	2.1	2.4	3.0	6.5	17.8
	21	142	1.7	2.0	2.4	5.4	14.5

Tabela 3.13 - Distâncias máximas entre a EB e o REP no percurso ascendente

Como se pode verificar estas distâncias são inferiores às que se obtiveram anteriormente para o percurso descendente. Deste modo é o percurso ascendente que limita a distância máxima na ligação. Na Secção 3.4 pode-se verificar quais os níveis de potência de emissão das EB que equilibram os dois percursos.

No que diz respeito ao ruído não existe no percurso ascendente preocupações, uma vez que os TMs por se encontrarem perto do REP, os níveis de potência do sinal aos terminais da antena de entrada são muito elevados face aos possíveis valores de potência de ruído que se

verifiquem dentro da carruagem do comboio. No entanto o ruído que é amplificado pelo REP pode atingir valores que prejudiquem outras ligações com a EB de TMs que estejam no exterior da carruagem a operar na mesma portadora.

Mais uma vez se efectuou os cálculos considerando um cabo radiante para a antena interior. A principal vantagem do cabo é ter perdas longitudinais pequenas, comparativamente com a radiação de uma antena em espaço livre. Deste modo, com o cabo radiante e um TM situado em qualquer zona da carruagem, a atenuação de propagação entre o TM e a entrada do REP é aproximadamente constante. No caso de uma antena, isto já não é verdadeiro, pois quando um TM está junto à antena, a atenuação de propagação entre a antena e este é muito menor. Assim se os TMs, perto da antena, estiverem a emitir à sua potência máxima (33 dBm) vão de certeza saturar o REP, o que não acontece com o uso do cabo radiante.

3.5.3 Influência do Ajuste de Ganho e do Controlo de Potência

Alguns REPs possuem um circuito de ajuste automático de potência, APAC, que reduz o ganho do equipamento até um máximo de 20 dB. Este circuito é activado no caso de se atingir a potência máxima de saída, evitando que o REP entre em saturação. Note-se que a potência na saída continua a ser a potência máxima que o REP consegue emitir, uma vez que a redução é efectuada no ganho. Como se verifica nas subsecções anteriores, esta potência máxima de saída introduz em alguns casos graves limitações. No percurso descendente esta limitação afectava a proximidade do comboio (REP) em relação às EBs. No percurso ascendente pelo facto de os TMs se encontrarem bastante perto do REP a situação agravava-se ainda mais.

As tabelas seguintes pretendem contabilizar quais as vantagens que este circuito traz. A Tab. 3.14 apresenta a distância mínima que se consegue entre as EBs e o REP no percurso descendente quando o APAC reduz o ganho do REP em 20 dB. Esta redução de 20 dB do ganho do REP traduz-se num aumento da potência de entrada do REP e consequentemente na redução da atenuação por propagação entre a EB e o REP na mesma proporção.

	G_{rep} [dB]	P_o [dBm]	$L_{P_{EB-REP}}$ [dB]	$d_{mínima}$ [km]				
				COST231-WI		Okumura-Hata		
				Urb	Sub	Urb	Sub	Rur
$f=900$ MHz	85	14	108	0.47	0.47	0.46	0.89	2.21
	6	11	111	0.56	0.56	0.56	1.10	2.70
	55	14	78	0.08	0.08	0.06	0.12	0.30
	8	11	81	0.09	0.09	0.08	0.15	0.37
	30	14	53	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04
	8	11	56	0.02	0.02	0.01	0.03	0.07
$f=1800$ MHz	85	14	108	0.22	0.25	0.25	0.55	1.51
	6	11	111	0.26	0.30	0.30	0.70	1.85
	55	14	78	0.03	0.04	0.03	0.08	0.20
	8	11	81	0.04	0.05	0.03	0.08	0.30
	30	14	53	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04
	8	11	56	0.01	0.01	0.01	0.02	0.05

Tabela 3.14 - Distâncias mínimas entre a EB e o REP no percurso descendente com APAC.

Comparando os valores da Tab. 3.14 com os valores anteriormente calculados sem o uso do APAC, Tab 3.11, pode-se verificar uma redução significativa das distâncias. Assim o comboio pode aproximar-se mais das EBs sem que o REP sature. Apesar de alguns valores estarem fora da validade dos modelos, verifica-se que na banda dos 900 MHz, as distâncias mínimas são por volta dos 0.5, 0.1 e 0.01 km para um ambiente urbano, no caso do repetidor estar a operar com um ganho de 85, 55 e 30 dB. Na banda dos 1800 MHz obtêm-se valores mais baixos. Verifica-se que, mesmo com o uso de APAC, estes valores podem ser problemáticos uma vez que existe a possibilidade do comboio se aproximar mais das EBs.

A Tab 3.15 não é mais que uma cópia da Tab. 3.12, onde se acrescenta uma redução de 20 dB através do APAC.

G_{rep} [dB]	$f=900$ MHz				$f=1800$ MHz			
	P_{eTM} [dBm]	P_i [dBm]	P_o [dBm]		P_{eTM} [dBm]	P_i [dBm]	P_o [dBm]	
			s/ APAC	c/ APAC			s/ APAC	c/ APAC
85	33	-27	58	38	30	-23	62	42
55	33	-27	28	8	30	-23	32	12
30	33	-27	3	-17	30	-23	7	-13

Tabela 3.15 - Potência de saída do REP no percurso ascendente com APAC.

Como se verifica na Tab. 3.15 os valores de potência de saída beneficiando do APAC não provocam a saturação do equipamento com excepção para o ganho máximo (85 dB). Note-se ainda que os valores apresentados para os ganhos inferiores são muito menores que a potência máxima de saída possível. Isto deve-se ao facto de se ter aplicado uma redução máxima de 20 dB numa situação em que não seria necessário tanto, pois o circuito reduz gradualmente o ganho, consoante a potência de entrada, por forma a que o REP emita, sempre que possa, a potência máxima de saída.

Estuda-se seguidamente o funcionamento do controlo de potência numa ligação entre o TM e a EB com a inserção do REP na ligação. Para o TM e para a EB o REP não existe, ou seja, ele é transparente na ligação. Quando a EB decide baixar a potência de emissão do TM podem não ocorrer alterações no nível de potência à saída do REP: o TM continuará a baixar até ao valor de potência de emissão de 5 dBm, podendo esta alteração reflectir-se ou não na EB, o que se deve ao facto de o nível de potência do sinal à saída do REP ser alterado por este consoante o número de portadoras que está a amplificar. Na prática o REP poderá não estar a oferecer todo o nível de potência para o sinal de um TM, pela razão mencionada anteriormente. Assim o controlo de potência vem posicionar o nível de emissão do TM no valor que seja suficiente para se obter a potência de saída máxima que o REP pode oferecer no momento; para além deste valor os decrementos já são directamente visíveis pela EB. Este fenómeno pode verificar-se também na ligação descendente; no entanto o controlo de potência só surge para distâncias do TM próximas da EB uma vez que só aí os níveis de potência de recepção que chega à EB são superiores ao nível de referência para o qual se inicia esse controlo. Esse valor do nível de referência é um parâmetro que pode ser ajustável, e diferente de operador para operador. No **Anexo O** apresenta-se o cálculo das estimativas das distâncias limites, entre a EB e o TM, onde existe controlo de potência no canal ascendente, **Tab. O.1**. Esta estimativa é feita para os ambientes urbano, suburbano e rural assim como para uma potência de emissão do TM de 33 dBm. Considera-se que a EB inicia o controlo de potência para um nível potência recebida superior a $EB_{CTR}=-80$ dBm.

Pode-se verificar que o controlo de potência entre o TM e a EB, quando o TM se aproxima da EB, só é iniciado a partir de distâncias da ordem de 1.5, 3 e 7 km para os

ambientes urbano, suburbano e rural, respectivamente. Observa-se também que o algoritmo de controlo de potência põe o TM na sua potência de emissão mínima (5 dBm) para distâncias à EB por volta dos 0,3, 0,5 e 1 km para os ambientes urbano, suburbano e rural. No mesmo Anexo a Fig. O.1 representa a variação da potência de emissão do TM em função da sua distância à EB, obtida com o modelo COST231-WI urbano, quando existe controlo de potência.

Como foi já referido anteriormente, o controlo de potência pode ser ou não eficaz. A ordem das distâncias da EB ao REP para o qual este começa a actuar é ligeiramente inferior às obtidas no anexo quando só se considera a EB e o TM, uma vez que a potência máxima de emissão do REP é inferior à do TM.

3.6 Equilíbrio das Ligações

A qualidade da comunicação é determinada pela pior ligação, ascendente ou descendente, logo não interessa impor num dos percursos uma potência muito alta, pois essa seria desperdiçada. Nesta secção determina-se qual o valor das potências de emissão que irão proporcionar o equilíbrio entre as ligações ascendente e descendente. É considerado uma EB com uma sensibilidade de -104 dBm e um ganho de 14 dBi. Considera-se o REP com uma sensibilidade de -105 dBm, uma potência de emissão máxima de 21 dBm e um ganho da antena exterior de 0 dBi. Contabiliza-se a existência de diversidade espacial e que o ganho de diversidade, G_{div} , é de 3 dB.

Na Fig 3.3 está representada a ligação REP-EB.

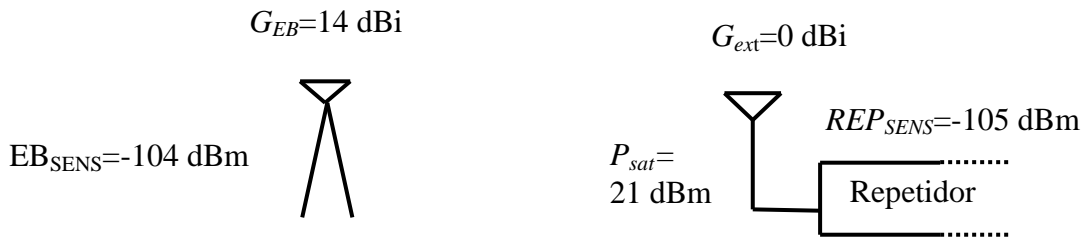


Figura 3.3 – Equilíbrio das Ligações.

Quando o REP está a emitir à sua potência máxima, P_{sat} , a potência recebida na EB, P_{rEB} , vem dada por:

$$P_{rEB[dBm]} = P_{sat[dBm]} + G_{ext[dBi]} + G_{EB[dBi]} + G_{div[dB]} - L_{pEB-REP[dB]} \quad (3.2)$$

onde G_{div} é o ganho de diversidade, $L_{pEB-REP}$ a atenuação de propagação entre o REP e a EB. Na situação em que a EB está a emitir com uma potência P_{eEB} , a potência recebida aos terminais do REP P_{rREP} é:

$$P_{rREP[dBm]} = P_{eEB[dBm]} + G_{EB[dBi]} + G_{ext[dBi]} - L_{pEB-REP[dB]} \quad (3.3)$$

As ligações ascendentes e descendentes estão equilibradas quando as potências de recepção, tanto da EB como do REP, tomam os respectivos valores do nível de sensibilidade EB_{SENS} e REP_{SENS} . Substituindo estes níveis nas expressões (3.2) e (3.3) e resolvendo em ordem à potência de emissão da EB chegamos a (3.4).

$$P_{eEBbal[dBm]} = P_{sat[dBm]} + G_{div[dB]} + \Delta_{SENS[dB]} \quad (3.4)$$

onde

$$\Delta_{SENS[dB]} = REP_{SENS[dBm]} - EB_{SENS[dBm]} \quad (3.5)$$

Obtém-se assim o valor óptimo da potência de emissão da EB que equilibra as ligações ascendente e descendente. No caso da EB emitir um valor acima deste, a ligação descendente é mais forte do que a ligação ascendente e vice-versa.

No caso de se ter um REP com uma sensibilidade já referida acima, obtém-se potências P_{eEBbal} , que equilibram as ligações de 23 e 20 dBm, no caso de o REP emitir potências máximas de emissão de 21 e 18 dBm, respectivamente.

Como se pode verificar, as potências P_{eEBbal} tomam valores sempre abaixo dos 23 dBm. Ao instalar um REP, os valores das potências de emissão das EBs já estão pré definidos e não seria conveniente alterá-los por questões de planeamento. Esses valores são normalmente da ordem dos 43 dBm, o que se pode concluir que para o caso dos REPs que a ligação descendente é mais forte em relação à ligação ascendente. É também de salientar que quanto maior for o número de portadoras a operar no REP menor é a potência de emissão das EB que equilibra as ligações.

3.7 Influência no exterior das Carruagens

Apresenta-se seguidamente um estudo sobre a influência do sinal emitido do REP para fora da carruagem. Importa neste estudo avaliar várias situações, como a possibilidade de dar cobertura a TMs fora das carruagens, provocar interferência no exterior, e perceber qual a influência do ruído amplificado no REP para o exterior. Para melhor ilustrar o cenário, apresenta-se na Fig. 3.4 um REP no interior de uma carruagem com perdas de penetração, VPL , de 20 dB, um ganho da antena exterior, G_{ext} , de 0 dBi; além disso também se incluem uma EB e um TM no exterior da carruagem com sensibilidades de referência e potências de emissão típicas.

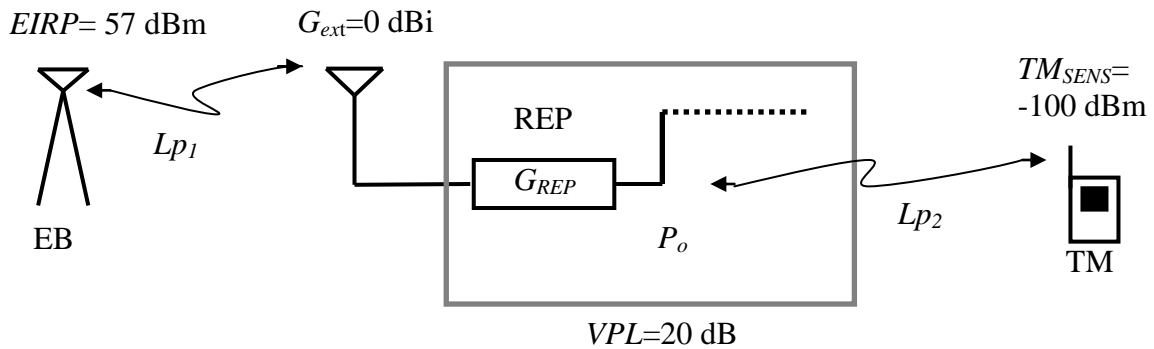


Figura 3.4 –Radiação para o exterior.

Interessa agora descobrir qual a distância a que um TM no exterior pode beneficiar do sinal amplificado pelo REP. Para a ligação descendente a atenuação de propagação entre o interior da carruagem e o TM, de modo o nível da potência de recepção seja no mínimo a sensibilidade de referência, é dada por:

$$Lp_{2[dB]} = P_{0[dBm]} + G_{cabo[dBi]} - VPL_{[dB]} - TM_{SENS[dBm]} \quad (3.6)$$

onde P_0 é a potência de saída do REP e G_{cabo} é o ganho da antena interior à carruagem, considerada neste caso um cabo radiante com perdas por transmissão e por radiação do cabo de 28.5 dB.

Inicia-se a análise para o percurso descendente, considerando que o REP emite no máximo uma potência de 14 ou 11 dBm, no caso de estar a amplificar 4 ou 8 portadoras. Obtêm-se os valores respectivos das atenuações L_{p2} de 65.5 ou 62.5 dB, que correspondem a distâncias entre o REP e o TM de 50 ou 35 m, tendo em conta a propagação por espaço livre. São apresentados os valores para propagação em espaço livre, uma vez que a estas distâncias o TM estaria muito perto e em linha de vista com o comboio (REP).

Assim pode-se concluir que para uma potência de emissão máxima do REP um TM na proximidade do comboio ainda recebe um nível de potência, proveniente do REP, superior à sua sensibilidade. Como é de esperar à medida que o comboio se afasta da EB a potência de emissão do REP decresce, fazendo diminuir rapidamente a distância do TM à carruagem para a qual seria possível efectuar a ligação através do REP.

Importa agora verificar o que acontece para o canal ascendente. Admitindo que o TM está a emitir uma potência máxima de 33 dBm e que a EB tem uma sensibilidade de referência, EB_{SENS} , de -104 dBm e um ganho da antena de 14 dBi.

$$L_{p2}[\text{dB}] = P_{ETM}[\text{dBm}] + G_{cabo}[\text{dBi}] - VPL[\text{dB}] - REP_{SENS}[\text{dBm}] \quad (3.7)$$

Na Tab. 3.16 apresenta-se os valores da atenuação L_{p2} e a atenuação $L_{pEB-REP}$ considerando novamente as três gamas de ganhos do REP.

P_{ETM} [dBm]	G_{REP} [dB]	L_p [dB]	d [km]				
			COST231-WI		Okumura-Hata		
			Urb	Sub	Urb	Sub	Rur
33	85	$L_{pEB-REP} = 98$	0.250	0.250	0.18	0.33	0.84
	55	$L_{pEB-REP} = 68$	0.040	0.040	0.03	0.05	0.11
	30	$L_{pEB-REP} = 43$	0.004	0.004	0.01	0.009	0.021
	-	$L_{p2} = 89.5$	0.140	0.140	0.10	0.19	0.48

Tabela 3.16 - Distâncias ao TM no exterior da carruagem para a ligação ascendente.

Apesar de algumas distâncias se encontrarem fora da validade dos modelos de propagação, pode-se concluir que as distâncias máximas para que seja possível efectuar ligação entre o REP e o TM no exterior da carruagem são maiores que no percurso ascendente. De facto era de esperar que estas distâncias fossem maiores, uma vez que a potência emitida pelo TM é maior que a potência emitida pelo REP. Assim, nesta ligação o canal descendente é o mais restritivo.

Os cálculos apresentados anteriormente descrevem as distâncias máximas a que um TM, fora da carruagem, se pode situar para que efectue a sua ligação para a EB através do REP. No entanto, pode acontecer que, além do sinal do REP, também o sinal directo da EB chegue ao TM. Como já foi referido, para o sinal mais atrasado não ser considerado interferente, a diferença de atrasos terá de ser menor que 16 μ s no caso da diferença entre os níveis de potência dos sinais for inferior à relação C/I_c . No Anexo P é feito um estudo da zona problemática onde a diferença de atrasos é igual e superior a 16 μ s. Retira-se deste anexo que a distância mais perto do REP onde se situa o início da zona problemática é de 1.35 km. No entanto, a esta distância o sinal para fora da carruagem já é muito fraco e inferior à sensibilidade de referência do TM, pelo que não haverá problemas de interferência, na aplicação dos REPs em comboios, relativamente aos TMs no exterior das carruagens. Neste

anexo evidencia-se também o comportamento da zona problemática com a distância entre o REP e a EB. A análise é feita para várias distâncias entre o REP e EB. Para a distância de 1,5 km, Fig. P.1 a zona crítica encontra-se muito perto da EB, pelo que será de esperar que os sinais provenientes do REP que atinjam o TM nessa zona sejam muito fracos em relação aos sinais vindos directamente da EB. Para uma distância de 2.7 km entre a EB e o REP a zona crítica situa-se a meio deste percurso, Fig. P.2. Para distâncias maiores entre EB e REP como é o caso de 5,4 km verifica-se que a zona crítica encontra-se mais próxima do REP, Fig. P.3. Nestes dois últimos casos pode acontecer que sinais com potências semelhantes, provenientes da EB e do REP, sejam nessa zona crítica considerados como sinais interferentes. No entanto, este fenómeno depende fortemente das atenuações sofridas por cada sinal e da direcção dos sectores da EB e REP.

No que diz respeito à aplicação em causa, o facto de existir elevadas perdas por penetração no veículo e pelo facto da antena escolhida para o interior ser um cabo radiante introduzindo também ele elevadas perdas, o nível de potência do sinal proveniente do REP será sempre inferior ao existente no exterior proveniente da EB. Pelo mesmo motivo não é de esperar que o ruído amplificado pelo REP afecte quer os TMs no exterior quer as EBs. No caso da antena interior escolhida ser por exemplo um dipolo, era necessário avaliar o comportamento do nível de ruído no exterior, uma vez que a relação C/N mínima só é assegurada para os TMs que usam o sinal proveniente do REP.

Para um valor de perdas por penetração inferior, como é o caso do comboio Inter Cidades, o alcance do sinal amplificado pelo REP será superior no exterior. No entanto mesmo para o caso anterior onde se tinha um ganho do REP muito elevado como é o caso de 85 dB esse alcance é relativamente contido. A afirmação anterior pressupõe uma analogia entre um comboio com perdas por penetração elevadas e ganhos de REP baixos com a situação inversa.

3.8 Benefícios da Aplicação

Até agora partiu-se sempre do pressuposto que o uso de REP nas carruagens dos comboios aumentava a distância a que estes poderiam estar das EBs. Importa perceber realmente que benefícios traz esta aplicação, em relação a aumentar a cobertura dentro das carruagens. Para isso, apresenta-se seguidamente o cálculo das distâncias máximas que o comboio pode estar da EB quando este possui ou não instalado REPs nas suas carruagens. Além disso, estuda-se também até que ponto pode ser vantajoso o uso, ou não, deste equipamento.

Considera-se duas situações, Fig. 3.5: uma carruagem com um REP com nível de sensibilidade de -105 dBm e ganho da antena exterior são de 0 dBi; uma carruagem sem REP, mas com um TM no seu interior, com sensibilidade de -100 dBm. Admite-se que a carruagem tem perdas de penetração do sinal, VPL , de 20 dB. Admite-se também que uma EB com um EIRP de 57 dBm está a dar cobertura aos dois casos. Note-se que não é importante referir a existência de TM na primeira situação, uma vez que se supõe que o ganho do REP é ajustado de forma a ter cobertura no interior.

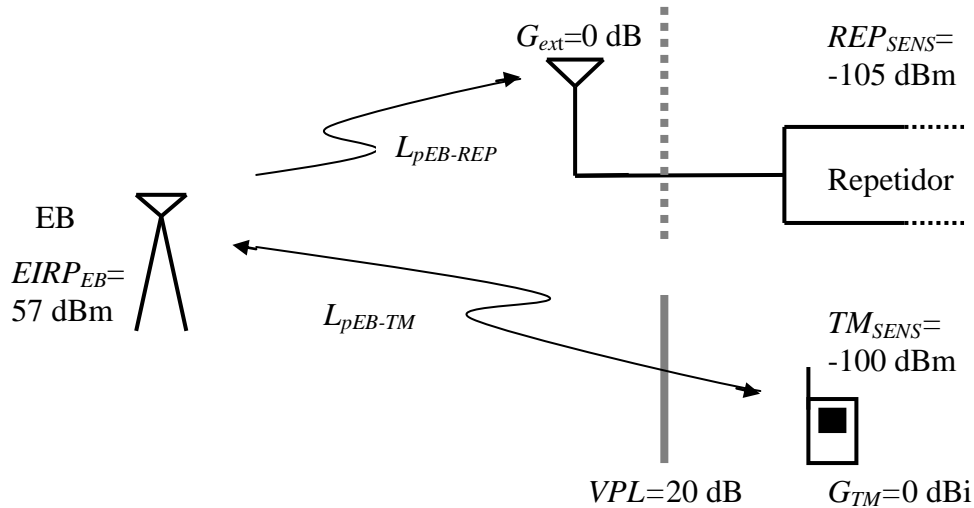


Figura 3.5 – Cenário da Aplicação com e sem REP.

Para se obter as distâncias máximas há que primeiro obter as atenuações máximas, entre a EB e o REP ou TM, que em ambas as situações permitem que a potência do sinal de recepção proveniente da EB seja da ordem das sensibilidades de referência dos REP e TM. Essas atenuações $L_{pEB-REP}$, entre a EB e a antena exterior do REP e L_{pEB-TM} , entre a EB e o TM dentro da carruagem, vem dadas por:

$$L_{pEB-REP}[\text{dB}] = EIRP_{EB}[\text{dBm}] + G_{ext}[\text{dBi}] - REP_{SENS}[\text{dBm}] \quad (3.8)$$

$$L_{pEB-TM}[\text{dB}] = EIRP_{EB}[\text{dBm}] - VPL[\text{dB}] - TM_{SENS}[\text{dBm}] + G_{TM}[\text{dBi}] \quad (3.9)$$

Estas expressões definem as atenuações máximas que se conseguem ter para que o nível de potência do sinal que chega ao REP ou TM seja superior às suas sensibilidades. Para os valores descritos anteriormente pode-se chegar a valores para as atenuações de $L_{pEB-REP}=162$ dB e $L_{pEB-TM}=137$ dB; verifica-se que há uma diferença de 25 dB. Esta diferença deve-se às perdas por penetração na carruagem, que são muito elevadas, e ao nível de sensibilidade do TM, que é maior do que o nível de sensibilidade do REP. Note-se que embora o valor do ganho da antena exterior seja idêntico ao ganho da antena de um TM, este poderia ser maior aumentando ainda mais a diferença. Os valores $L_{pEB-REP}$ e L_{pEB-TM} de atenuação correspondem a diferentes valores de distâncias para os vários modelos de propagação, Tab. 3.17. Também nesta tabela se calcula o acréscimo da distância, Δd , entre a EB e o comboio, que se ganha com a utilização do REP.

	d [km]				
	COST231-WI		Okumura-Hata		
	Urbano	Suburbano	Urbano	Suburbano	Rural
$L_{pEB-REP}=162$ dB	12.4	12.4	16.8	32.6	80.6
$L_{pEB-TM}=137$ dB	2.7	2.7	3.2	6.2	15.3
Δd [km]	9.7	9.7	13.6	26.4	65.3

Tabela 3.17 – Benefícios da introdução do REP.

Conclui-se que, com a introdução do REP as distâncias a que a carruagem pode estar da EB são muito superiores comparadas com as distâncias obtidas, para os vários ambientes,

quando não é utilizado o REP; note-se que algumas distâncias obtidas estão fora da validade dos modelos. No entanto, pode-se concluir que para ambientes urbanos o acréscimo da distância com o uso do REP é por volta dos 10 km, aumentando um pouco mais para os ambientes suburbano e rural. Assim, a carruagem com o uso de REP pode estar mais afastada da EB do que só com o TM no interior da carruagem. No entanto, com uma potência de entrada do REP igual à sua sensibilidade, e para se garantir que com o seu uso chega ao TM pelo menos o valor da sua sensibilidade, então o ganho do REP não pode ter qualquer valor. Para esse efeito o ganho mais adequado é dado por:

$$G_{REP[\text{dB}]} = TM_{SENS[\text{dBm}]} - REP_{SENS[\text{dB}]} + L_{cabo1m[\text{dB}]} \quad (3.10)$$

Considerando que a atenuação cabo radiante é de 60 dB, obtém-se um ganho de 65 dB.

Como será de esperar para o caso em que se tem perdas por penetração inferiores, os benefícios desta aplicação serão consideravelmente menores podendo mesmo ser preferível um melhoramento da rede com a introdução de novas EBs. No caso do comboio Inter Cidades o valor das perdas por penetração está muito perto do valor que se obtém nos veículos automóveis, logo é natural que as preocupações de cobertura já englobem este tipo de comboios.

3.9 Ganho Óptimo

Nesta secção pretende-se aferir qual deverá ser o ganho ideal dos REPs, para a sua aplicação nos comboios. Para a determinação do ganho, além das características físicas do próprio REP, é necessário atender à especificidade da aplicação. Como se pode verificar o ganho do REP está sempre implicado nas secções anteriores. Assim compreende-se que para a escolha do ganho que melhor se adapte a esta aplicação seja necessário atender não só às distâncias a que se encontra a linha das EBs mas também aos equipamentos adjacentes ao REP e especificidades como o controlo de potência. São efectivamente estes últimos pormenores que interessa compreender um pouco mais. Note-se que, mais uma vez, a análise é realizada para o comboio Alfa Pendular, uma vez que este veículo apresenta perdas por penetração muito elevadas.

Como já foi visto na secção anterior para que a aplicação seja benéfica o ganho do REP não deve tomar valores menores que 65 dB. Note-se que na prática os níveis de sensibilidade do REP e do TM podem ser muito semelhantes, de forma que o que interessa compensar com o ganho do REP seja somente a atenuação do cabo, pelo que se pode optar por um ganho não inferior a 60 dB. Acima deste valor de ganho, o nível de sinal no exterior da carruagem é igual ao nível de sinal no interior junto ao TM, ganhando-se assim as perdas de penetração das carruagens. Para ganhos menores, o nível de sinal no interior em relação ao exterior decresce na mesma proporção que o ganho. Este raciocínio é tanto válido para o canal ascendente como descendente.

No que diz respeito ao controlo de potência é difícil definir qual o valor de ganho do REP que pode afectar o seu funcionamento, uma vez que a margem de variação da potência de emissão do TM é muito grande. Como já foi apresentado anteriormente, o REP por ter uma potência de emissão limitada pelo número de portadoras a amplificar, pode não reflectir a diminuição da potência de emissão do TM. A solução seria aplicar um ganho menor; no entanto, numa situação em que hajam poucas portadoras para amplificar pode não ser vantajoso reduzir o ganho do REP. Assim, para contemplar todas as situações o ganho a escolher seria o que novamente compense as perdas do cabo radiante, ou seja 60 dB. Acima

deste valor, continuar-se-ia a por em causa o funcionamento do controlo de potência, uma vez que a gama de variação da potência de emissão é limitada. Note-se que a maior preocupação é para a ligação ascendente, uma vez que no outro percurso o sinal fortemente amplificado pelo REP estará sempre contido pela carruagem não afectando os TMs no exterior.

Como se pode verificar as duas condições anteriores apontam para uma escolha de compromisso. Desta forma o ganho do REP ideal seria de 60 dB. Importa agora perceber para que distâncias é que este ganho permite a proximidade ou afastamento da linha férrea em relação às EBs. Como já foi apresentado anteriormente para qualquer valor de ganho do REP na Secção 3.2, as distâncias máximas que o REP pode estar da EB, dependendo do tipo de ambiente, são descritas na Tab. 3.12, isto porque as distâncias máximas são limitadas pelo nível de sensibilidade do REP. Na seguinte tabela apresenta-se as distâncias mínimas que o REP pode estar da EB para que não sature.

	G_{rep} [dB]	P_o [dB m]	$L_{PEB-REP}$ [dB]	$d_{mínima}$ [km]				
				COST231-WI		Okumura-Hata		
				Urb	Sub	Urb	Sub	Rur
<i>Sem APAC</i>	60	14	103	0.35	0.35	0.33	0.64	1.60
	8	11	106	0.42	0.42	0.40	0.79	1.95
<i>Com APAC</i>	60	14	83	0.10	0.10	0.09	0.17	0.42
	8	11	86	0.12	0.12	0.10	0.21	0.51

Tabela 3.18 - Distâncias mínimas entre a EB e o REP no percurso descendente

Mais uma vez se pode referir que as distâncias máximas são muito elevadas face a distâncias que se consegue obter sem o uso de REP. A estimativa, para o ganho de 60 dB, das distâncias mínimas da EB ao REP para que este não sature podem ser ligeiramente elevadas considerando que na realidade é possível ultrapassar facilmente estas distâncias. Apesar de algumas destas distâncias estarem fora da validade dos modelos, pode observar-se que com o APAC as distâncias envolvidas assumem valores menores. Assim, é de considerar aceitável o valor de 60 dB para o ganho do REP uma vez que as distâncias que se impõe são facilmente praticadas na realidade.

CAPÍTULO 4

Análise da Linha de Comboio

4.1 Estimativa dos Níveis de Potência

Após ter-se estudado vários assuntos relacionados com REPs e a sua possível inserção nas carruagens de comboios, interessa agora estudar a aplicação destes a uma linha de comboio específica, a linha ferroviária Lisboa-Porto. Não é do âmbito deste trabalho efectuar um projecto de planeamento celular ao longo da linha de comboio, mas sim adaptar a uma rede já existente de um dos operadores de comunicações móveis (Telecel/Vodafone) a aplicação dos REPs nos comboios. Assim com este intuito, começa-se por estimar quais as condições e ambientes de propagação a fim de determinar quais as áreas a cobrir e qual o nível de potência do sinal emitido pelas EBs já existentes ao longo da linha. Há ainda que referir que este estudo só foi efectuado na banda dos 900 MHz.

Através da inspecção das cartas topográficas do exército e com a localização das EBs já existentes obtém-se os ambientes de propagação por vários troços, uma vez que os ambientes ao longo da linha Lisboa-Porto são diversos. Para uma melhor visualização, os cenários ao longo da linha encontram-se no **Anexo Q**. Assim, pode-se observar que desde a EB Sta. Apolónia_1 até à EB Forte da Casa_16 se considera que o cenário de propagação é sempre urbano. A partir desta EB até à EB Castanheira Ribeira_22 há um misto de ambiente urbano e suburbano. Para norte de Castanheira Ribeira_22, já se observam algumas zonas rurais, até que se entra novamente em ambiente urbano e suburbano entre Azambuja Centro_25 e Santarém Cidade_28. A partir da zona de Santarém até Albergaria dos Doze_37 o ambiente de propagação é novamente rural. Verifica-se que antes desta última EB existem dois túneis: o primeiro entre Alburitel_35 e Caxarias_36 com um comprimento de 700 m; o segundo entre Caxarias_36 e Albergaria dos Doze_37 com aproximadamente 650 m de comprimento. As duas EB seguintes, Pombal Cidade_38 e Pombal Shopping_39 já se encontram em zonas urbanas e suburbanas. Desta última até Coimbra Portagem_43 (zona suburbana), aparecem novamente zonas rurais que se estendem até Aveiro_57. A partir daqui até Estarreja_64 aparecem novamente zonas rurais. De Estarreja_64 até Coimbrões_77 há um misto de ambientes suburbano e rural, passando posteriormente a ser somente urbano nos arredores do Porto. Por vezes, em certas zonas existentes ao longo da linha, o cenário de propagação além de possuir vegetação também tem algumas características montanhosas com cotas do terreno bastante elevadas.

Com o objectivo de caracterizar toda a linha férrea divide-se esta por troços. Cada troço é da responsabilidade de uma EB, pelo que importa definir as suas fronteiras. Assim, para cada troço surgem três casos: distância mínima da EB à linha, e distâncias máximas, uma a Norte e outra Sul. Através da inspecção das cartas topográficas retiram-se as distâncias mínimas à linha, para cada uma das EBs, e as distâncias máximas estimam-se como metade da distância entre duas EBs consecutivas adicionada de 20%. Com isto quer-se garantir a inexistência de zonas sem cobertura para se efectuar com eficácia *handovers*.

A análise das cartas topográficas permite estimar os diversos ambientes atravessados pelo sinal e também possíveis obstáculos à propagação tais como vegetação e relevo adverso. Para cada EB e para cada uma destas distâncias, máximas e mínima, caracteriza-se o ambiente de propagação e obtém-se as respectivas atenuações de propagação segundo os modelos de

Okumura-Hata e COST231-WI, abordados no Capítulo 2. Uma vez que a única informação que se dispõe em relação às EBs é a sua localização, as alturas a que as antenas se encontram foram consideradas para um mastro de 30 m ao qual se adicionou a cota do terreno onde se encontram as EBs. Para os TM, a altura considerada é de 3.6 m acima da cota do terreno onde se encontra. Note-se que a altura típica dum TM é de 1.8 m o que leva a que na realidade a estimativa seja optimista: no entanto, a altura escolhida pretende obter valores de atenuação por propagação para a aplicação em causa, uma vez que 3.6 m se trata da altura dos comboios. Em alguns casos, quando se julga ser necessário, é adicionada uma margem para contabilizar a atenuação introduzida pela vegetação que o sinal rádio pode atravessar. Uma vez que se trata de algo dificilmente estimável considera-se uma atenuação suplementar de 10 dB, que segundo o modelo de Weissberger [Corr99] dado por (4.1), corresponde a aproximadamente a 33 m de vegetação atravessada pelo sinal, o que na prática pode ser um valor aceitável. Note-se que esta atenuação suplementar tem como intuito ser adicionada à atenuação de espaço livre.

$$L_{veg[dB]} = \begin{cases} 0.063 \cdot f_{[MHz]}^{0.284} \cdot d_m[m] & , \quad 0 \leq d_m \leq 14 \\ 0.187 \cdot f_{[MHz]}^{0.284} \cdot d_m^{0.588} & , \quad 14 \leq d_m \leq 400 \end{cases} \quad (4.1)$$

Seguidamente, apresenta-se o método de cálculo da atenuação suplementar para algumas situações onde se verifica que existe obstrução à passagem do sinal por intermédio de um obstáculo. Para a estimativa dessa atenuação aplica-se o modelo de obstáculo em lâmina, podendo assim ser calculada a atenuação adicional introduzida por um obstáculo cuja espessura é desprezada, sendo deste modo analisado como se se tratasse de uma lâmina. Apesar de se tratar de uma aproximação “grosseira”, a simplicidade do método e os resultados satisfatórios que surgem da sua aplicação justificam o seu uso. Assim, a atenuação adicional é dada por [Corr99]:

$$L_{obst} \cong 6.4 + 20 \log(\nu + \sqrt{\nu^2 + 1}) \quad , \quad \text{para } \nu > -1 \quad (4.2)$$

onde ν é o parâmetro adimensional dado por:

$$\nu = h \sqrt{\frac{2d}{\lambda d_E d_R}} = h \sqrt{\frac{2d}{\lambda d_E (d - d_E)}} \quad (4.3)$$

em que h é a altura do obstáculo acima do raio directo entre as antenas de emissão e recepção, d é a distância entre antenas, d_E é a distância do obstáculo à antena de emissão, e λ é o comprimento de onda.

Os valores das atenuações obtidos pelos dois modelos usados, já com os suplementos referidos, apresentam-se na Tab. R.2, Anexo R. Pode-se verificar que a distância mínima das EBs à linha variam entre 0.05 e 3 km, enquanto que as distâncias máximas variam entre 0.4 a 10 km. Pode-se também observar que em alguns casos além de se adicionar a atenuação suplementar já referida para contabilizar a vegetação, também se introduz a atenuação de obstáculo. Assim, no Anexo R são analisadas algumas situações onde se considera que a ligação está obstruída e apresentam-se os valores da atenuação suplementar. Ao longo da linha, os diversos cenários de propagação proporcionam para as distâncias mínimas atenuações globais entre 72 a 144 dB para o modelo COST231-WI e 70 a 136 dB para o modelo OH. A mesma análise para as distâncias máximas evidencia variações de 105 a 180 dB através de COST231-WI e de 100 a 165 dB para OH. Note-se que alguns valores de

atenuação são bastante elevados devido à presença dos obstáculos e da vegetação que figuram normalmente nas zonas rurais. É também importante referir que devido à tão vasta gama de distâncias, em alguns casos, a validade dos modelos de propagação é ultrapassada.

Com base nas atenuações obtidas anteriormente pretende-se seguidamente calcular qual a potência de emissão das EBs mais adequada para que se garanta um nível de sinal ao longo da linha que permita o uso do REP no comboio.

Como já foi referido no Capítulo 2 o desvanecimento lento é provocado por variações da escala do cenário de propagação à medida que o TM se desloca. Os efeitos do desvanecimento lento são contabilizados no cálculo da percentagem de área coberta numa célula (F_{area}), através do desvio padrão σ do modelo de propagação, que para efeitos deste trabalho foi considerado como um valor típico de 6 e 10.3 dB para o modelo do COST231-WI e de Okumura-Hata, respectivamente. Para se validar estes valores teriam de ser efectuados estudos mais aprofundados sobre os vários cenários de propagação.

A F_{area} é essencial para a determinação da qualidade de serviço e neste trabalho admitiu-se que esta é de 95%. No Anexo S encontram-se descritas as expressões de F_{area} para se determinar a margem de desvanecimento ΔP , definida como a diferença entre a potência média e a potência mínima, sendo esta obtida para cada modelo de propagação utilizado. Como se pode ver na expressão (S.7) o valor de n no modelo de Okumura-Hata depende da altura efectiva da EB dada por (S.2); um valor típico de 3.5 é o usado nos cálculos. Na Tab. 4.1 apresenta-se os resultados para a margem de desvanecimento, juntamente com os valores escolhidos para os parâmetros anteriormente referidos, em relação aos dois modelos de propagação utilizados.

	σ [dB]	n	ΔP [dB]
COST231-WI	6	3.8	5.7
Okumura-Hata	10.3	3.5	12

Tabela 4.1- Margem de desvanecimento.

De seguida analisa-se as ligações ascendente e descendente entre a EB e o REP através das expressões (4.4) a (4.7) e calcula-se o $EIRP$ das EB e do REP:

- EB a Emitir:

$$EIRP_{EB} = P_{eEB} + G_{EB} = P_{rREP} - G_{ext} + L_{pEB-REP} \quad (4.4)$$

com

$$P_{rREP} = REP_{SENS} + \Delta P \quad (4.5)$$

- REP a Emitir:

$$EIRP_{REP} = P_{eREP} + G_{eREP} = P_{rEB} - G_{EB} - G_{div} + L_{pEB-REP} \quad (4.6)$$

com

$$P_{rEB} = EB_{SENS} + \Delta P \quad (4.7)$$

Para esse efeito, considera-se que o REP e a EB tem sensibilidades de -100 e -104 dBm e que os seus ganhos das suas antenas são de 0 e 14 dBi, respectivamente. O valor da sensibilidade considerada para o REP é maior do que a sua sensibilidade já referida de -105 dBm; opta-se por um valor maior e mais próximo da sensibilidade do TM porque, além de não se operar no limiar de sensibilidade do REP, efectua-se o dimensionamento de maneira a

que os TMs possam operar fora da carruagem sem o REP. É também aqui contabilizado a existência de diversidade espacial que como já foi referido beneficia a ligação ascendente em 3 dB. A atenuação de propagação, $L_{pEB-REP}$, que entra nestes cálculos é a correspondente à máxima encontrada para as duas distâncias máximas para Norte e para Sul de cada EB e para cada modelo de propagação. No **Anexo S** apresentam-se também na **Tab. S.1** os vários valores de *EIRP* para os modelos de propagação de COST231-WI e OH.

No percurso descendente, pode-se verificar que alguns *EIRP* das EBs calculados tomam valores muito elevados (60-80 dBm) face aos valores das potências de emissão das EBs que são usados hoje em dia, já referidos no Capítulo 2. O mesmo se pode observar no percurso ascendente para as potências de emissão do REP. Aqui, em alguns casos, para a ligação não ficar deteriorada o nível de potência de emissão do REP necessita de tomar valores superiores à sua potência máxima de emissão, 24 dBm, quando este está a amplificar 4 portadoras. Além destes valores, são também apresentados na **Tab. T.1** as potências de recepção na linha de comboio onde a distância à EB é mínima, calculadas quando as EBs estão a emitir os EIRPs estimados. Nos casos em que os EIRPs estimados são maiores que o valor máximo de 57 dBm, então é utilizado este valor. Todos estes valores estimados irão ser analisados mais pormenorizadamente na **Secção 4.3.** após a apresentação da campanha de medidas ao longo da linha.

4.2 Medidas ao longo da linha

Na secção anterior é feita uma tentativa de caracterizar a cobertura da linha ferroviária através de modelos de propagação. Uma vez que são feitas aproximações e assumidos pressupostos na implementação dos modelos de propagação, torna-se necessário obter valores reais de modo a ser possível caracterizar a linha com bastante fiabilidade. Desta forma, pretende-se com maior segurança identificar e confirmar eventuais situações adversas que possam surgir por desconhecimento de todos os factores que influenciam a propagação nos diversos ambientes, ao longo de todo o percurso, e também devido à ausência de informação em relação às características das EBs que servem a linha.

Como na secção anterior já foi feita uma tentativa de descrição dos ambientes e EBs ao longo da linha apresenta-se somente nesta secção a descrição do processo de medida e efectua-se uma análise dos resultados, referindo a forma como foram processadas as medidas.

As medidas foram realizadas novamente com a ferramenta TEMS, já descrita anteriormente, onde se adicionou um equipamento receptor de GPS. Desta forma é possível referenciar geograficamente todas as medidas, permitindo assim identificar o nível de potência do sinal em cada um dos troços da linha.

O veículo utilizado para a realização das medidas, ao longo da linha férrea, foi o comboio Alfa Pendular e o Inter Cidades. Todo o equipamento de medidas foi instalado na cabine do Alfa Pendular e da locomotiva do Inter Cidades. Nomeadamente os receptores foram instalados da seguinte forma: o TM instalado junto ao vidro dianteiro e o receptor de GPS do lado de fora de uma pequena janela preso através de ventosas. Adicionalmente existiam ainda: computador portátil para registar as medidas; carregador de bateria do TM e transformador para alimentação do GPS. O facto de não se ter nenhuma antena exterior no cimo do comboio deve-se a uma exigência da CP que não permitiu nenhum equipamento exterior, por motivos de segurança. No entanto, o GPS foi colocado exteriormente após uma cedência de última hora, uma vez que a cabine limitava a recepção do sinal proveniente de todos os satélites visíveis no exterior. Desta forma a recolha do sinal GSM sofre perdas por penetração na cabine, o que leva a menores valores para os níveis de potência do sinal ao

longo da linha férrea. As medidas foram efectuadas em chamada e em *dualband*; no entanto a análise das medidas apresentada neste trabalho será somente na banda GSM900, porque existem muito poucas EBs a emitir na banda GSM1800.

Como é de esperar a quantidade de medidas recolhidas ao longo da linha é enorme o que leva a uma apresentação mais selectiva. O método escolhido para apresentar as medidas, similarmente às estimativas, foi o seguinte: são recolhidos os resultados para o ponto da linha férrea onde a distância para as EBs é mínima e também para um ponto a meio de duas EBs consecutivas. Além disso, em cada troço entre dois destes pontos escolhidos apresenta-se o nível de potência de sinal recebido mais baixo e mais alto, de entre todas as portadoras existentes. Estes resultados são apresentados no Anexo T. Neste anexo encontram-se os valores obtidos na viagem Porto-Lisboa no Alfa Pendular e na viagem Lisboa-Porto no Inter Cidades. Alguns valores não são apresentados, no caso das medidas realizadas no Inter Cidades, uma vez que a alimentação proveniente da locomotiva nem sempre possibilitou que o receptor de GPS funcionasse. À partida seria de esperar encontrar valores mais elevados de potência do sinal nos pontos onde a distância entre a linha e a EB é mínima; no entanto isto quase nunca se verifica uma vez que se encontram níveis mais elevados nos troços entre pontos, o que se deve provavelmente às orientações diversas dos sectores e às alterações provocadas pelos diversos ambientes na propagação. Um raciocínio idêntico podia ser feito para os pontos intermédios onde seria de esperar os menores valores de potência do sinal, mas novamente isto não se verifica; aqui, às razões já apontadas podem acrescentar-se questões de *handover*. Não é fácil estimar quais os locais escolhidos para as zonas onde as operadoras definem os *handovers*, podendo estes estar exactamente a meio entre duas EBs ou mais perto de uma delas.

Analisando os resultados apresentados no Anexo T para o nível de potência recebido, pode verificar-se que existem grandes diferenças ao longo da linha. Na Tab. 4.2 apresentam-se as variações para os pontos onde a distância entre a EB e a linha é mínima e para os pontos a meio entre duas EBs consecutivas. Além disso apresenta-se também as variações ao longo dos troços entre pontos dos valores mais baixos e mais altos do nível de potência.

	Alfa Pendular		Inter Cidades	
	P [dBm]	EB mais próxima	P [dBm]	EB mais próxima
Em d_{\min}	-35 a -103	FilExpo - Alburitel	-42 a -100	Hosp. Gaia - Alburitel
Entre EBs	-43 a -91	ExpoNorte – Santarém Sul	-48 a -97	Espinho – Albergaria
Mais baixo	-49 a -107	Caves - Albergaria	-50 a -109	Caves – Alburitel
Mais alto	-24 a - 87	FilExpo - Alburitel	-25 a -81	Caves – Alburitel

Tabela 4.2 - Medidas ao longo da linha Lisboa-Porto.

Como se pode verificar pela tabela anterior, nos valores para a distância mínima surgem níveis muito baixos de potência que se devem principalmente à presença de obstáculos além das razões mencionadas anteriormente. Para os valores entre EBs surgem níveis muito elevados, uma vez que por se tratarem de EBs muito próximo umas das outras o nível de potência deve ser elevado. No que diz respeito ao níveis de potência de sinal mais baixo encontrado ao longo dos troços, verifica-se toda uma variedade de valores que novamente podem ser justificados por diversas razões que afectam a propagação, como o ambiente e as características das EBs. No entanto pode verificar-se que para alguns troços os níveis de sinal são preocupantemente baixos sendo inferiores ao nível de sensibilidade do TM e REP. Para os níveis mais altos encontrados pode-se verificar que surgem alguns níveis bastante elevados que podem provocar a saturação do REP. Além disso note-se que para alguns troços o valor mais elevado é bastante baixo o que indicia que a linha em alguns troços tem bastante má cobertura.

Uma outra análise interessante que se pode efectuar dos resultados é a média dos valores obtidos no Inter Cidades ser cerca de 1.6 dB superior aos valores obtidos no Alfa Pendular, com um desvio padrão de 9 dB. À partida este não seria um resultado esperado, uma vez que se pretende avaliar o nível de potência do sinal no exterior, pelo qual às medidas efectuadas pelo TM no interior das cabines têm de ser adicionadas as respectivas perdas por penetração. Como as perdas são superiores no Inter Cidades, seria de esperar piores níveis de potência no interior da sua cabine. Note-se porém que a comparação entre as duas medidas pode ser grosseira, uma vez que os comboios deslocaram-se em sentidos diferentes; assim, quando a viagem é feita num sentido os sectores das EBs que são vistos de frente são obstruídos pelo comboio no sentido inverso, visto que as medidas foram sempre realizadas na cabine da frente. Outro factor que pode adicionar alguns erros é o facto de não haver garantias de que as medidas são comparadas exactamente no mesmo local devido às leituras serem aleatórias e devido aos erros de posicionamento do GPS. Além de tudo isto, existe sempre a mobilidade do veículo e do próprio ambiente, que por se alterar constantemente, provoca leituras diferentes. A confirmar também a grande imprecisão, está o elevado desvio padrão de cerca de 9 dB. Infelizmente este processo de medida, embora seja o mais rápido e simples de implementar, tem como maior falha o facto de não existir uma antena exterior, algo que resolvia as desigualdades entre os sentidos das viagens.

4.3 Análise e Comparação dos valores estimados e medidos

Embora já tenham sido referidos sobejamente os resultados obtidos nas medidas efectuadas ao longo da linha, esta secção vem apresentar a comparação destes com os valores anteriormente estimados.

Na Secção 4.1 foram apresentados os cálculos das estimativas das potências de emissão das EBs e do REP para que ao longo da linha de comboio se recebesse no mínimo uma potência de -100 dBm. Foram também apresentadas as potências de recepção na linha para a distância mínima quando as EBs estão a emitir os EIRPs estimados e quando estão a emitir os EIRPs máximos de 57 dBm. Para os EIRPs das EB, pode-se observar na Tab. T.1 que alguns valores estimados ultrapassam os valores máximos permitidos pelos equipamentos: é o caso das EBs 26_Cartaxo, 28_Santarém_C, 31_Golegã, 32_Entroncamento, 35_Alburitel, 38_Pombal_Cidade, 41_Soure, 43_Coimbra_Portagem e 66_Ovar. Para estas EBs as atenuações máximas que foram estimadas são muito elevadas devido quer à vegetação, obstáculos ou porque a distância para a EB mais próxima é demasiado elevada; assim as áreas de cobertura destas EBs não são completamente cobertas e podem existir zonas onde não exista o mínimo de potência de sinal exigido. Pela mesma razão, também na ligação ascendente, alguns dos valores estimados dos EIRPs do REP estão acima dos valores máximos que este pode emitir, 24 dBm, para o caso de estar a amplificar 4 portadoras: é o caso das áreas das EBs 16_Forte_da_Casa, 17_Alverca_Centro, 22_Castanheira_Ribeira, 26_Cartaxo, 28_Santarém_Cidade, 30_Alcanhões, 31_Golegã, 32_Entroncamento, 35_Alburitel, 36_Caxarias, 37_Albergaria_dos_Doze, 41_Soure, 43_Coimbra_Portagem, 50_Curia, 64_Estarreja, 65_Avanca, 66_Ovar e 74_Miramar.

Na campanha de medidas efectuadas ao longo da linha encontram-se regiões onde o nível de potência do sinal é muito próximo ou inferior do nível de sensibilidade dos TM. Note-se que se considera as perdas por penetração dos veículos em causa, tendo sido adicionados aos valores de nível de sinal medidos 4.5 dB para o Alfa Pendular e 10.5 dB para o Inter Cidades. As regiões onde se verificam valores de potência de recepção abaixo dos -90 dBm, pertencem à área de cobertura das EBs 26_Cartaxo, 30_Alcanhões, 31_Golegã,

34_Charneca_Penalva, 35_Alburitel, 36_Caxarias, 37_Albergaria_dos_Doze, 38_Pombal_Cidade, 40_Bonitos, 41_Soure, 42_Montemor_o_Velho, 48_Pampilhosa_Botão, 54_Oiã e 55_Oliveirinha.

Como se pode verificar algumas das regiões onde se estimou haver falta de cobertura, são confirmadas pelas medidas. Noutras regiões verifica-se que na realidade a situação não é tão grave, uma vez que poderão existir outras EBs circundantes com melhores condições à propagação. Outra razão provável é o facto das estimativas em algumas circunstâncias serem pessimistas; no entanto, a situação inversa também se verifica, existindo zonas que na realidade são problemáticas e que nas estimativas efectuadas não se sobressaem. Para solucionar estas zonas onde existe carências de cobertura deverá instalar-se novas EBs ou REP fixos. No Anexo U analisa-se uma situação específica; trata-se do troço entre as EBs 37_Albergaria_dos_Doze e 38_Pombal_Cidade onde existe falta de cobertura. Para solucionar este problema, coloca-se um REP fixo ou uma nova EB, e efectua-se a estimativa de cobertura nessa zona. Verifica-se que tanto com o REP como com a EB a escassez de cobertura é resolvida; no entanto, a EB, além de abranger uma maior área de cobertura devido a emitir um EIRP maior, também aumenta a capacidade de tráfego. Apesar destas vantagens, é, como já foi referido, uma solução mais dispendiosa comparativamente ao REP.

O valor da potência mínima de recepção para a qual o REP, com um ganho de 60 dB, atinge a potência de saturação de 14 dBm é de -46 dBm. Como se pode verificar na **Tab. T.1**, existem EBs onde o nível de potência de recepção estimado, para as distâncias mínimas à linha, está acima desse valor; é o caso de 19_Alhandra, 23_VNRainha, 29_Santarém, 36_Caxarias, 41_Soure, 43_Coimbra_Portagem, 49_Mealhada, 50_Curia, 64_Estarreja, 73_Granja, 74_Miramar e 83_Campanhã; no caso da EB 36_Caxarias a potência estimada recebida na linha chega a ultrapassar a margem do APAC de 20 dB. Na campanha de medidas obteve-se também valores muito elevados de potência ao longo da linha; valores superiores a -46 dBm de nível de potência de recepção são facilmente encontrados em sinais provenientes de cerca de metade as EBs; algumas delas além de activarem o APAC, excedem a sua gama de actuação, sendo o caso das EBs 9_Fil_Expo, 61_Esgueira, 71_Espinho_Casino e 80_Caves. A razão pela qual se verifica um elevado número de situações onde a potência ao longo da linha é muito elevada dever-se-á principalmente ao facto de as EBs estarem a emitir à sua máxima potência por decisões de planeamento do operador. Segundo as estimativas, os EIRPs suficientes para efectuar a cobertura da linha ferroviária com as EBs actuais, este problema era minimizado. No entanto, o objectivo das EBs não é somente cobrir a linha de comboio, mas sim toda a região circundante. Uma vez que é pouco viável recolocar as EBs em sítios mais convenientes, sugere-se para solucionar este problema, uma reorientação de sectores e eventual diminuição de algumas potências de emissão. Note-se que embora existam muitas zonas onde se verificam valores elevados de potência do sinal ao longo da linha, somente a quando da paragem dos comboios nas estações ferroviárias se obriga aos REP a permanecerem bastante tempo com o ganho reduzido pelo APAC. Nas restantes zonas ao longo da linha devido à elevada velocidade destes veículos o APAC não seria usado tão frequentemente, pelo que seriam inicialmente as estações ferroviárias as zonas de principal atenção.

4.4 Crítica à Solução da CP

Como já foi referido, as carruagens do comboio alfa pendular já estão equipadas com REPs Kathrein, estando estes ajustados com um ganho de 48 dB, em ambas as ligações ascendente e descendente. Ligado a este equipamento está uma antena exterior à carruagem

com 0 dBi de ganho e uma antena interior do tipo cabo radiante. Além disso, também já referido na Secção 3.2, obteve-se através de medidas, a atenuação do cabo radiante de 60 dB, desde a saída do REP até aos lugares dos passageiros, situados a 1 m do cabo radiante. O REP usado tem potências de saturação de 30 e 20 dBm no canal ascendente e descendente, quando está a amplificar só uma portadora.

Como se pode verificar, o valor do ganho da solução instalada no alfa pendular, 48 dB, é inferior à atenuação entre a saída do REP e o TM, 60 dB. Assim, no canal descendente a potência de sinal no interior da carruagem é menor do que no exterior, ficando sem se vencer as perdas de penetração da carruagem. No entanto, com o valor de ganho de 48 dB a saturação só é atingida para valores de entrada de -28 dBm. Como se viu nas medidas ao longo da linha de comboio Lisboa-Porto, este valor é facilmente atingido, sendo activado o APAC para valores de potência de entrada superiores.

No canal ascendente, com o ganho referido, atenuação do cabo radiante de 60 dB e com um TM a emitir à sua potência máxima de 33 dBm, nunca é atingida a saturação, a não ser que o REP esteja a amplificar 8 portadoras ($P_{sat}=21$ dBm). No entanto, nunca atingindo a saturação, o REP nunca irá aproveitar a sua potência máxima de emissão, limitando a distância que este pode estar da EB.

A análise que foi efectuada neste trabalho só tem em conta que o REP está no máximo a repetir 4 portadoras, ao mesmo tempo, de um só operador de comunicações móveis. No entanto, o REP instalado no comboio Alfa Pendular é selectivo a toda a banda GSM900, estando por isso a amplificar todas as portadoras, dos três operadores de Portugal, existentes num dado local. Deste modo, supondo que este REP vê um total de 12 portadoras ao mesmo tempo, sua potência máxima de emissão passa a ser muito mais baixa tanto na ligação ascendente como descendente. Como já se referiu, com estas potências mais baixas, a distância que o REP tem que estar relativamente às EBs, para que as ligações não fiquem deterioradas é muito menor. Num caso extremo em que o REP seja forçado a amplificar um número elevado de portadoras, em ambiente urbano, é provável que o TM consiga ter melhor sinal directamente da EB, mesmo sofrendo perdas por penetração, do que através do REP.

CAPÍTULO 5

Conclusões

Este trabalho teve como principal objectivo estudar os repetidores (REPs) da banda GSM de modo a que se encontrasse a melhor solução para aplicá-los nas carruagens de comboios. Focaram-se principalmente os aspectos de propagação do sinal, saturação do REP, amplificação e introdução de ruído e atraso também introduzido pelo REP. Foram também referidos quais os tipos de antenas utilizadas nesta aplicação, bem como os tipos de REPs.

Na sua fase inicial foram estudadas algumas características do sistema GSM, como a estrutura hierárquica da rede, as bandas de frequências, 900 e 1 800 MHz, e níveis de potência de emissão, dos TMs e das EBs para as bandas GSM900 e GSM1800. Foi também efectuada uma breve descrição da arquitectura GPRS, adicionada à rede GSM, que introduz a interligação da rede GSM a redes de comutação de pacotes.

Posteriormente, foram analisadas várias características e requisitos dos REPs, sendo uma dessas características a entrada do REP em oscilação que deve ser evitada. Conclui-se que, para que o REP não entre em oscilação, o isolamento entre as antenas do REP deve ser no mínimo 15 dB superior ao seu ganho.

Outro assunto é a classe dos REPs que deve de ser usada para aplicação em causa. Devido ao número elevado de EB existentes ao longo da linha ferroviária, o REP tem de amplificar todas as portadoras do espectro GSM. Para este tipo de aplicação o equipamento existente são REPs de banda larga. Para se conseguir aumentar a cobertura de uma EB, o uso de REPs é consideravelmente uma solução mais barata do que instalar novas EBs. No entanto, com esta solução, não há um aumento da capacidade de tráfego. Uma outra limitação introduzida devida ao atraso do REP é a distância máxima de cobertura de uma célula, 35 km, que é reduzida de 2.1 km com um atraso do REP de 7 μ s. Ao instalar um REP há também que ter em conta que num local onde a diferença de atraso, entre o sinal directo da EB e uma cópia deste sinal que passa pelo REP, for maior que 16 μ s, então o sinal mais atrasado é considerado interferente.

Um outro aspecto que vai impor uma potência mínima de entrada do REP é o ruído amplificado e introduzido. Esta potência mínima deve ser pelo menos superior em $C/N=10$ dB ao ruído obtido na saída. Uma potência máxima de entrada é também requerida, de modo a que o REP não entre na saturação e gere produtos de intermodulação.

Foram utilizados os modelos de propagação do COST231 – Walfisch Ikegami, válido para $f \in [800; 2000]$ MHz, e o de Okumura-Hata, válido para $f \in [150; 2000]$ MHz, para a previsão das distâncias percorridas pelo sinal para uma dada atenuação de propagação. Abordou-se alguns modelos de interiores para se ter a percepção das perdas que alguns tipos de materiais oferecem à passagem do sinal. Além de modelos de interiores, foi também estudado um modelo que contabiliza perdas de penetração em veículos automóveis (VPL). Para este modelo conclui-se que para veículos do tipo *mini-van*, *full size car* e *sport car* as perdas de penetração são respectivamente por volta de 9, 8 e 13 dB.

Descreveu-se para a aplicação dos REPs em comboios qual o equipamento a ser utilizado, como antenas e cabos. Chega-se à conclusão que para a antena interior à carruagem é preferível usar um cabo radiante, pois este apresenta perdas longitudinais desprezáveis comparativamente com as perdas transversais. Deste modo o sinal emitido/recebido por um TM em qualquer ponto da carruagem sofre sempre a mesma atenuação até ao REP. O mesmo

não acontecia com o uso de antenas do tipo dipolo, onde essa atenuação seria menor no caso de o TM estar junto da antena, o que poderia provocar mais facilmente a saturação do REP.

Após se ter a percepção das perdas de penetração em veículos automóveis, foram feitas medidas de VPL em dois tipos de comboios para as carruagens de passageiros. Para o comboio Inter cidades obteve-se para as carruagens, na banda dos 900 e 1800 MHz VPL por volta de 10 e 13 dB, respectivamente. Para o comboio Alfa Pendular obtiveram-se atenuações por volta dos 20 e 28 dB para a banda dos 900 e 1800 MHz, respectivamente. Pode-se concluir que para a banda dos 900 MHz a penetração é menor comparada com a banda dos 1800 MHz e que o VPL do comboio Alfa Pendular toma valores maiores relativamente ao Inter cidades, já que o Alfa Pendular apresenta janelas com dimensões mais pequenas, obstruindo mais a passagem do sinal.

O REP, além de introduzir ruído, também o amplifica. Assim, calculou-se o ruído externo existente para na banda do GSM, chegando-se para o GM900 a valores da ordem dos -125 e -136 dBm para zonas urbanas e rurais, respectivamente, e para esta mesmas zonas em GSM1800 obteve-se ruídos externos de -131 e -136 dBm. Aos terminais de uma antena o ruído é dado pela componente externa amplificada pelo ganho da antena e pela componente interna, que é devida ao rendimento da antena. Para rendimentos da ordem dos 98% verifica-se que o ruído interno é da ordem dos -138 dBm. Quanto maior for o rendimento da antena, menor é o ruído introduzido por esta.

Estudou-se também qual a redução do ganho e incremento do factor de ruído da cadeia, na qual se insere o REP, devida aos cabos que ligam o REP às antenas. Conclui-se que essa redução e esse incremento não são significativos e podem ser desprezados nos cálculos.

Posteriormente estudou-se as distâncias máximas e mínimas que o REP pode estar da EB. A distância máxima provém de ter que existir um valor de potência à saída do REP, pelo menos superior de C/N em relação ao ruído à sua saída. Para o modelo de COST231-WI estimou-se distâncias máximas por volta dos 12 km para ambientes urbanos e suburbanos em GSM900. Segundo o modelo de OH e nesta mesma banda, as distâncias máximas já tomam valores por volta dos 17 km em ambientes urbanos. As distâncias mínimas provêm da potência máxima de emissão do REP que para não ser atingida, o REP não se deve aproximar muito das EBs; após ser atingida a saturação, o REP ainda pode beneficiar do ajuste de ganho (APAC) que reduz o ganho do REP à medida que a potência na sua entrada aumenta, podendo o REP estar ainda mais próximo das EBs. Foram obtidos vários valores para a estimativa desta distância para vários valores do ganho do REP; verifica-se que quanto menor for esse ganho menor é a distância mínima; como seria de esperar, todas estas distâncias tomam valores menores para a banda do GSM1800. Foi também estudado o algoritmo de controlo de potência com a inserção do REP na ligação, concluindo-se que este controlo pode ou não ser eficaz, dependendo do REP estar ou não a emitir à sua potência máxima.

Verificou-se que as ligações ascendente e descendente, entre a EB e o REP, não estão equilibradas, sendo sempre a ligação descendente a mais forte. Esta situação não é vantajosa pois a qualidade da ligação é definida pela ligação mais fraca. Foi também descrita qual a influência do REP para o exterior das carruagens, e estimou-se a que distâncias um TM pode estar da carruagem para que ainda seja possível efectuar a ligação com a EB, através do REP, obtendo-se uma estimativa desta distância, considerando propagação em espaço livre, por volta dos 50 m.

Efectuou-se um estudo para se obter qual o ganho da distância, entre a EB e o REP, que se obtém com o REP introduzido na ligação entre a EB e o TM, chegando-se a valores de distâncias estimadas por volta de 10 km. Chegou-se à conclusão que o ganho ideal do REP deve ser tal que compense as perdas da antena interior à carruagem (cabo radiante), de modo a que no mínimo o nível da potência de sinal no exterior da carruagem seja igual no interior. Para valores de ganho superiores o REP poderá atingir a sua potência máxima de emissão

mais facilmente. Nos cálculos efectuados obteve-se um ganho óptimo de 60 dB para um REP com potências de saturação de 20 e 30 dB nas ligações ascendente e descendente, respectivamente. É de referir que com potências de saturação maiores o REP poderia ter ganhos e potências de entrada maiores até que a saturação fosse atingida.

Estudou-se também a quais as eventuais contrapartidas de aplicar os REP às carruagens de comboio da linha ferroviária Lisboa-Porto. Para isso estimou-se os EIRPs das EBs da operadora Telecel/Vodafone já existentes ao longo da linha de maneira a que não existisse má cobertura ao longo da linha, chegando-se a valores de EIRPs muito acima dos valores máximos emitidos pelas EBs. Foram também estimados os EIRPs dos REPs necessários para que a ligação ascendente não ficasse deteriorada; também neste caso existem zonas onde era necessário que o REP emitisse uma potência de emissão maior que a sua potência máxima de emissão para que a ligação ascendente não ficasse deteriorada. Efectuou-se também a comparação das medidas de potência de sinal efectuadas ao longo da linha com os valores estimados; verifica-se que algumas das zonas onde o nível de potência de sinal é muito baixo coincidem com as zonas problemáticas identificadas nas estimativas. Sugere-se que nessas zonas sejam instaladas novas EBs ou REP fixos, de maneira a resolver esses problemas de cobertura. Por outro lado, existem zonas da linha ferroviária onde o nível de potência de sinal é tão elevada que o REP entra na saturação e até passa o limite do APAC; uma vez que é muito difícil de alterar a localização das EBs, sugere-se para solucionar este problema a reorientação de sectores ou diminuição da potência de emissão das EBs.

Para que os REP sejam benéficos, a situação ideal seria ter na linha de comboio níveis de potência não muito elevados, de modo que, com um ganho do REP de no mínimo 60 dB, o REP não activasse o APAC. Por outro lado, também ao longo da linha, os níveis de potência não devem de ser inferiores ou próximos da sensibilidade do REP.

Apesar da cobertura da Linha do Norte não se encontrar actualmente na situação ideal para se aplicar REPs em comboios, podem existir outras linhas de comboio onde essa aplicação seja benéfica. De qualquer modo, é sempre necessário efectuar um estudo particular para essa linha em questão.

Além das soluções que já se referiram anteriormente, a melhor solução para a Linha do Norte seria ter um REP com potências de saturação mais elevadas; assim, no canal descendente a gama de variação das potências de entrada poderia ser maior, sem que a saturação fosse atingida; no canal ascendente as distâncias máximas a que o REP pode estar da EB para efectuar a ligação iriam aumentar.

A análise efectuada à solução da CP, já instalada nos comboios Alfa Pendular, permitiu concluir que o REP instalado encontra-se com um ganho muito baixo, pelo que não se consegue vencer as perdas do cabo radiante que serve no interior da carruagem; deste modo, o nível de potência de sinal, proveniente do REP, que é recebido no lugar dos passageiros é menor do que no exterior da carruagem. Uma vez que o REP do Alfa Pendular é selectivo à banda do GSM900, e portanto, amplifica as portadoras dos três operadores existentes num dado local, é provável que em alguns casos, mesmo com um ganho baixo, seja atingida a saturação.

No futuro, seria interessante estudar a cobertura de outras linhas de comboio existentes, para se verificar se seria benéfica a aplicação dos REPs nos comboios dessa linha. Estes resultados seriam de especial interesse, tendo em conta que os operadores de comunicações móveis estão dispostos a melhorar a qualidade da rede neste tipo de transportes. Poder-se-ia também estimar as modificações e diferenças desta aplicação na banda do GSM1800 e na banda do sistema de terceira geração, UMTS.