INSTITUTO SUPERIOR
DE TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

Dimensionamento de um Sistema de Comunicações para Suporte ao Sistema de Exploração Ferroviária no CFM Sul

Francisco Eugénio Samuel

Dissertação submetida para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia de Redes e Sistemas de Comunicação
concedido pelo ISUTC, sob orientação científica do IST

ISUTC -MERSC-1- IST

Júri

Supervisor:	Prof. Luis M. Correia (IST)
Presidente:	Prof. Luis M. Correia (IST)
Membros:	Prof. António Rodrigues (IST)
	Prof. Jorge Ferraz de Oliveira (ISUTC)

Junho de 2011

Para

Lulu

Yara e Solange

Agradecimentos

A Deus, pela saúde que me tem dado para que possa realizar este trabalho.

Ao Prof. Luís M. Correia pelo apoio e orientação académica prestados ao longo do trabalho, bem como pela disponibilidade sempre demonstrada.

À irmã Taeko Eguchi, pela amizade e apoio, no meu dia a dia.

Resumo

O CFM Sul pretende incrementar o número de circulações na rede ferroviária do Sul (linhas de Ressano Garcia, Goba e Limpopo), de forma a estabelecer as condições para atender aos cenários mais agressivos de demanda para os próximos anos. Para atingir este objectivo, há necessidade de instalar um sistema de telecomunicações que cubra a rede ferroviária em referência, e que possa permitir a implementação de um novo sistema de controlo de tráfego, com ganhos significativos no tempo de trânsito e consequente aumento do número de comboios/dia, através da centralização dos centros de controlo (actualmente baseado no sistema de ordens de avanço, conhecido como "*paper order*"), monitorização contínua dos activos e aumento de segurança. O âmbito deste trabalho é a identificação e dimensionamento da infra-estrutura de radiocomunicações a instalar, baseado na operação da malha através de comunicações de dados, utilização de um sistema "*fail-safe*", de alta confiabilidade, disponibilidade, facilidade de manutenção, e disponibilização de recursos de visualização, tomando em conta os aspectos relacionados com a selecção de tecnologia mais aplicável, respeito pelos requisitos da especificação técnica, atenção especial aos estudos do plano de cobertura, da capacidade de tráfego do sistema da configuração e alinhamento com recomendações internacionais da área (UIC e ITU).

Do estudo realizado, a tecnologia adoptada foi o TETRA, na banda de [440, 470] MHz, por razões relacionadas com os requisitos acima mencionados e pela sua grande compatibilidade com o ambiente ferroviário. Os estudos de cobertura indicam que são necessárias 15 estações base de rádio, com uma portadora em cada estação para as necessidades de tráfego na rede, em configuração "1 canal de controlo + 3 canais de usuário", para voz e dados, a um débito de 28,8 kbps por portadora.

Palavras-chave

Sinalização Ferroviária, Sistemas de Comunicação, Dimensionamento, TETRA.

Abstract

CFM intends to increment railway network circulation (Ressano Garcia, Goba and Limpopo lines) in order to cater for more aggressive demands for the upcoming years. In order to accomplish this objective, there is the need to install a telecommunications system that covers the whole railway network, to allow a traffic control system implementation with significant advantages in the transit time, and the consequent increase of the number of trains per day through centralisation of control centres (currently based on “paper order” systems), continuous monitoring of all assets, and the increase of safety in general. The purpose of this study is the identification and design of the radio communications infrastructure to be installed based on network operations through data communication, utilization of a Fail-Safe system with a high reliability, availability, easy maintenance and availability of visualisation resources. The following elements were taken into consideration: the most appropriate technology selection; compliance with the specific technical requirements with special attention to coverage plans, traffic capacity of the proposed system, and system configuration, in order to be in line with the international recommendations (UIC and ITU).

The technology adopted is TETRA at the [440, 470] MHz band, given its compatibility with the rail environment. Coverage studies indicate a total of 15 radio base stations, with one radio channel per base station for the traffic network needs, with the configuration “1 control channel + 3 users channels”, for voice and data, at a data rate of 28.8 kbps per channel.

Key Words

Railway Signalling, communication system, dimensioning, GSM-R and TETRA

Índice

Agradecimentos v

Resumo vii

Abstract viii

Índice ix

Lista de Figuras xiii

Lista de Tabelas xv

Lista de Siglas xvii

Lista de Símbolos xix

1. Introdução 1

1.1 Motivação e enquadramento 2

1.2 Objectivos 4

1.3 Estrutura 5

2. Sistemas e Requisitos 7

2.1 Sistemas de comunicação e sinalização ferroviários 8

2.1.1 Introdução 8

2.1.2 Rádio convencional na banda dos 400 e 900 MHz 8

2.1.3. Sistema trunking MPT1327 9

2.1.4 Sistema TETRA 9

2.1.5. Sistema GSM-R 10

2.1.6 Sistema ERTMS 10

2.1.7 Sistema OTMS 12

2.1.8. Sistemas PTC 14

2.2 Requisitos para o sistema de telecomunicações 16

2.2.1 Requisitos básicos 16

2.2.2 Análise técnica 18
2.2.3 Escolha de Sistema 19
2.3 GSM-R: Global System for Mobile Radio Communications for Railways 20
2.3.1 Características do sistema e da rede 20
2.3.2 Cobertura e Qualidade de serviço 22
2.4 TETRA 23
2.4.1 Definição do sistema 23
2.4.2 Arquitectura da Rede 23
2.4.3 Interface aérea 25
2.4.4 Mecanismos de Transmissão 26
2.4.5 Bandas de frequências 27
2.4.6 Capacidade do sistema 28
2.4.7 Serviços de Dados 28
2.4.8 Parâmetros gerais do sistema 29
2.4.9 Potenciais aplicações ferroviárias 30
2.5 Comparação do TETRA com o GSM-R e Escolha do Sistema 31
3. Análise da Implementação 33
3.1 Balanço de potência (Ligação) 34
3.2 Caracterização do desvanecimento 35
3.2.1 Efeito Doppler 36
3.2.2 Desvanecimento lento 37
3.2.3 Desvanecimento Rápido 38
3.2.4 Área de cobertura 38
3.3 Modelos de Propagação 39
3.3.1 Considerações gerais 39
3.3.2 COST 231-walfish-ikegame 40
3.3.3 Modelo de Okumura-Hata 41
3.4 Equipamentos 42
3.4.1 Antenas 43

3.4.2 Transceptores 46
3.5 Tráfego 48
3.5.1 Modelo de estimação 48
3.5.2 Grau de serviço 49
3.5.3 Capacidade requerida por célula 50
3.6 Plano de frequências 51
3.7 Interferência 54
3.7.1 Interferência co-canal 54
3.7.2 Interferência canal adjacente 55
4. Dimensionamento 57
4.1 Características do sistema 58
4.2 Escolha de equipamentos 58
4.2.1 TBS (TETRA Base stations) 58
4.2.2 Estações móveis e portáteis 59
4.3 Ambiente e características de utilização 60
4.4 Análise unicelular 63
4.4.1 Características dos equipamentos a utilizar 63
4.4.2 Disponibilidade do sistema 64
4.4.3 Cálculo da altura efectiva 64
4.4.4 Raio de cobertura 65
4.5 Cobertura da primeira estação base 66
5. Análise de desempenho 69
5.1 Linha de Goba 70
5.2 Linha de Ressano Garcia 72
5.3 Linha do Limpopo 73
5.4 Análise de desempenho 86
5.4.1 Aspectos qualitativos 86
5.4.2 Aspectos quantitativos 87
5.5 Fiabilidade 89

5.6 Trabalhos a executar para instalação do sistema 91
6. Conclusões 93
6.1 Conclusões 94
6.2 Trabalhos futuros 95
Anexo 1. Características adicionais do GSM-R 97
Processo de desenvolvimento do Standard 98
Razões da adopção do GSM-R 98
Descrição da estrutura da rede GSM-R 101
Exigências de planeamento da rede de GSM-R 105
Conjunto de características adicionais e aplicações GSM-R 106
Serviço de chamadas em grupo 109
Anexo 2. Descrição do sistema PTC 111
Anexo 3. Características da antena a instalar nas estações base 117

Lista de Figuras

Figura 1.1: Rede Ferroviária do CFM Sul 3

Figura 2.1: Diagrama do Sistema CBS (Extraída em[Will09]). 15

Figura 2.2: Configuração desejada para o sistema de comunicações. 18

Figura 2.3: Alocação de Frequência na várias variantes do GSM 20

Figura 2.4: estrutura da rede GSM-R (Extraída de[Hile99]). 21

Figura 2.5 Arquitectura da rede TETRA e as interfaces definidas (Extraída de[DuGi99]). 24

Figura 2.6: Stack de Protocolos do AI para MS/BS(Extraída de[DuGi99]. 26

Figura 2.7: Estrutura do TDMA do TETRA (Extraída de[DuGi99]). 27

Figura 3.1: Link budget (Extraído de[DuGi99]). 34

Figura 3.2: Ilustração do efeito Doppler 36

Figura 3.3: Estrutura geral da rede TETRA. 43

Figura 3.4: Processo para estimação de canais de tráfego. 51

Figura 3.5: Canais de rádio e numeração de canais em 440 a 470 MHz (Extraído em[ETSI97]) 52

Figura 4.1: Linha de Goba 62

Figura 4.2: Linha de Ressano Garcia 62

Figura 4.3: Linha do Limpopo 62

Figura 4.4: Infra-estrutura (torres) de telecomunicações na rede do CFM Sul 63

Figura 4.5: Componentes de cálculo da h_{be} 65

Figura 4.6: Cobertura da primeira TBS 67

Figura 5.1: Cobertura da linha de Goba 72

Figura 5.2: Cobertura da linha de Ressano Garcia 73

Figura 5.3: Cobertura das estações de Marracuene e Manhiça 76

Figura 5.4: Cobertura das estações de Ungubana e Motaze 78

Figura 5.5: Cobertura das estações de Chokwe e Mont'Alto 80

Figura 5.6: Cobertura das estações de Mabalane e Combumune 82

Figura 5.7: Cobertura das estações de Mapai e Chicualacuala 85

Figura 5.8: Mapa resumo da localização das estações na rede do CFM Sul 85

Figura 5.9: Repetição de frequências em células 88

Figura 5.10: Arquitectura do Software (Extraído em [ROHI02]) 89

Figura A1.1: Fluxograma para Especificação e Validação do GSM-R 99

Figura A1.2: Aplicações do GSM-R, identificados pelo EIRENE 100

Figura A1.3: Arquitectura do GSM-R, para vias de baixa velocidade e áreas rurais 103

Figura A1.4: Arquitectura do GSM-R, para vias equipadas com ETCS 104

Figura A1 – 4: Estrutura de rede totalmente duplicada, com células de rádio overlay 105

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Especificações mínimas para cobertura GSM-R(Extraído em[Eire06]) 22

Tabela 2.2: Parâmetros de QoS para o GSM-R (Extraído em[Eire06]). 23

Tabela 2.3: Grupo de frequências para TETRA, recomendadas pelo CEPT. 28

Tabela 2.4: Sumário dos parâmetros de TETRA(Extraído em[DuGi99]) 30

Tabela 2.5: Comparação do GSM-R e TETRA a nível dos serviços de dados. 31

Tabela 2.6: Comparação de GSM-R e TETRA a nível do serviço de voz. 32

Tabela 2.7: Vantagens e Desvantagens comparativas TETRA vs. GSM-R. 32

Tabela 3.1: Antenas direccionais para estações base 44

Tabela 3.2: Antenas direccionais para estações base (cont.) 45

Tabela 3.3: Antenas omnidireccionais para estações base 45

Tabela 3.4: Antenas para locomotivas 46

Tabela 3.5: Estações base 46

Tabela 3.6: Estações Móveis 47

Tabela 3.8: Estações portáteis 47

Tabela 3.9 Parâmetros de tráfego típicos em redes TETRA. 50

Tabela 3.10: Canais disponíveis para uso. 53

Tabela 3.11: Factor de reuso 55

Tabela 4.1: Ambiente de utilização e exigências ao sistema 61

Tabela 4.2:Caracteristicas dos equipamentos a instalar. 64

Tabela 4.3: Determinação da altura efectiva da 1ª estação base. 65

Tabela 4.4: Parâmetros para o modelo de Okumura-Hata. 66

Tabela 5.1: Características da estação base (Boane) 70

Tabela 5.2 Raio de cobertura da BS e MS com antenas direccionais. 70

Tabela 5.3: Características da estação base (Goba Monte) 71

Tabela 5.4: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% e 90%(Antenas direccionais) 71

Tabela 5.5: Características da estação base (Moamba) 72
Tabela 5.6: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)..... 73
Tabela 5.7: Características da estação base (Marracuene) 74
Tabela 5.8: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% e 90% (Antenas direccionais) ... 74
Tabela 5.9: Características da estação base (Manhiça)..... 75
Tabela 5.10: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% e 90% (Antenas direccionais) . 75
Tabela 5.11: Características da estação base (Ungubana)..... 76
Tabela 5.12: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)..... 77
Tabela 5.13: Características da estação base (Motaze)..... 77
Tabela 5.14: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)..... 77
Tabela 5.16: Características da estação base (Chokwe) 78
Tabela 5.17: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)..... 79
Tabela 5.18: Características da estação base (Mont'Alto) 79
Tabela 5.19: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)..... 79
Tabela 5.20: Características da estação base(Mabalane)..... 80
Tabela 5.21: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)..... 81
Tabela 5.22: Características da estação base(Combumune)..... 81
Tabela 5.23: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)..... 82
Tabela 5.24: Características da estação base(Combumune)..... 82
Tabela 5.25: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)..... 83
Tabela 5.27: Características da estação base (Mapai)..... 83
Tabela 5.27: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)..... 83
Tabela 5.28: Características da estação base(Mapai)..... 84
Tabela 5.29: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)..... 84
Tabela 5.30: Coordenação de frequências. 88
Tabela 5.31: Trabalhos a realizar..... 92
Tabela A1.1. Tempos de estabelecimento de chamadas definidos pelo EIRENE 102
Tabela A1 – 2: Características adicionais para GSM-R..... 109
Tabela A1 – 3: Relação entre a velocidade e a distância de realização com sucesso do handover . 109

Lista de Siglas

APCO 25	*Association of Public Safety Communications Officials, Project 25*
AREMA	*American Railway Engineering and Maintenance-of-way*
ATC	*Automatic Train Control*
ATCS	*Advanced Train Control Systems*
CAD	*Computer Aided Despatching*
CBS	*Communications Based Signalling*
CCCH	*Common Control Chanel*
CCH	*Control Chanel (TETRA)*
CCO	Centro de Comando Operacional
CELP	*Code Excited Liner Predition*
CENELEC	*Comité Européen de Normalisation Electrotechnique*
CEPT	*European Conference of Telecommunications Administrations*
CFM Sul	Portos e Caminhos de Ferro de Moçambique Sul
CTC	Comando de Tráfego Centralizado
DMI	*Driver-Machine Interface*
DMO	*Direct Mode of Operation*
DMR	*Digital Mobile Radio*
DQPSK	*Differential Quaternary Phase-Shift Keying*
EIRENE	*European Integrated Railway Radio Enhaced Network*
EIRP	*Equivalent Isotropic Radiated Power*
ERTMS	*European Rail Traffic Management System*
ERTMS	*European Rail Traffic Management System*
ETCS	*European Train Control System*
ETSI	*European Telecommunications Standardization Institute*
FDD	*Frequency Division Duplex*
FFSK	*Fast Frequency Shift Keying*
GPS	*Global Positioning System*
GSM	*Global System for Mobile Radio Communication*
GSM-R	*Global System for Mobile Radio Communication for Railways*
ICBS	*Interoperable Communication Based Signalling*

MCCH	*Main Control Chanel*
MMI	*Main Machine Interface*
MORANE	*MObile radio RAilway Networks in Europe*
MPT 1327	*Ministry of Post and Telecommunications*
OBC	*Onboard Computer*
OTMS	*Optimised Train Management System*
PAMR	*Public Access Mobile Radio*
PMR	*Private (or Professional) Mobile Radio*
PSTN	*Public Switched Telephone Network*
PTC	*Positive Train Control*
PTT	*Push To talk*
QoS	*Quality of Service*
RF	*Radio Frequency*
SDS	*Short Data Service*
SwMI	*Switching and Management Infrastructure*
TCH	*Traffic Channel*
TDMA	*Time Division Multiple Access*
TETRA	*TErrestrial Trunked Radio*
TWS	*Track Warranty System*
UHF	*Ultra High Frequency*
UIC	*Union International des Chemins de Ferre*
UNISIG	*Union Industry of Signalling*
VHF	*Very High Frequency*
WAP	*Wireless Application Protocol*

Lista de Símbolos

d	*distância da antena do móvel ao solo*
f	*frequência*
f_d	*desvio de frequência*
G_e	*Ganho da antena de emissao*
G_e	*Ganho da antena de recepcao*
h_{be}	*Altura da torre*
h_m	*Altura do móvel*
H_{mu}	*Factor de correção da altura da antena do móvel*
K	*Tamanho mínimo do cluster*
k_{oa}	*coeficiente de correção para área abertas*
k_{qo}	*coeficiente de correção para áreas quase abertas*
L_0	*Perdas de propagação no espaço*
L_p	*Perdas de propagação*
L_{ptotal}	*Atenuação total*
L_{tm}	*Difração causada pelo telhado*
L_{tt}	*Perdas por difração múltipla*
M_{FFF}	*Desvanecimento rápido*
M_{SFS}	*Desvanecimento lento*
$N_{cell\ del}$	*Numero medio de chamadas*
N_{pop}	*População da área*
P_{del}	*Probabilidade de a chamada ser atrasada*
P_e	*Potencia de emissão*
P_{pen}	*Taxa de penetração*
P_{put}	*Taxa de utilização*
P_r	*Potencia de recepção*
R	*Factor de reutilização*
T	*tráfego em Erlang*
T_{ut}	*Trafego medio por utilizador*
w	*largura da rua*
θ	*ângulo de deslocamento*
v	*velocidade*
σ	*desvio padrão*
σ_s	*desvio padrão suburbano*
σ_u	*desvio padrão urbano*
τ	*Tempo de espera*
φ	*orientação na rua/raio directo*
ϕ	*Ângulo do enlace em relação a rua em graus*

Capítulo 1

Introdução

O presente capítulo faz uma apresentação da empresa portos e caminhos de ferro de Moçambique e os objectivos do presente trabalho.

1.1 Motivação e enquadramento

A empresa Portos e Caminhos de Ferro de Moçambique (CFM) foi uma empresa bastante próspera no passado, tendo chegado a ser considerada a mais produtiva de toda a África Austral, transportando cerca de 13 milhões de toneladas ano.

Para tal, o sistema ferroviário do CFM, em especial do CFM-Sul, foi outrora equipado com sistema de sinalização baseado em circuitos de via, na linha de Ressano Garcia e Limpopo (parcial).

Em 2008, o CFM-Sul lançou um programa de reabilitação das suas linhas, com destaque para a linha de Ressano Garcia (fronteira com a República da África do Sul), com um custo de 20 milhões de USD, essencialmente para a reabilitação da linha e estações, tendo ficado por implementar um sistema de telecomunicações.

Assim, o CFM-Sul tem disponível uma verba que pretende aplicar na instalação de um sistema de gestão de tráfego que permita aumentar os canais horários e livre de factores humanos (baseado em computador), para permitir o aumento da capacidade de tráfego e rentabilizar a infra-estrutura existente. É percepção geral que este sistema deverá evoluir ao longo do tempo com o aumento das necessidades de operação da empresa.

Para prossecução desses objectivos, há uma necessidade de identificar, entre as várias tecnologias e sistemas, as que melhor se adaptem as condições e objectivos de operação do CFM-Sul.

Com efeito, outrora, o sistema ferroviário tinha como suporte de comunicações e sinalização, o modo de exploração em CTC com circuitos de via UM 71 e um cabo pressurizado de telecomunicações para o caso da linha de Ressano Garcia, linhas aéreas para o caso da linha do Limpopo e Goba, esta última servida depois por um sistema de controlo via rádio. A Figura 1.1, mostra a rede ferroviária do CFM Sul.

Contudo, estes suportes de transmissão foram sujeitos a actos de vandalismo, encontrando-se obsoletos e fora de serviço há vários anos, estando neste momento o CFM-Sul sem nenhum sistema automático de tráfego.

Em função dessa degradação dos sistemas, a circulação de comboios é presentemente realizada via rádio na base do sistema de ordens de avanço, também designado regime de exploração simplificada, "*Paper order*".

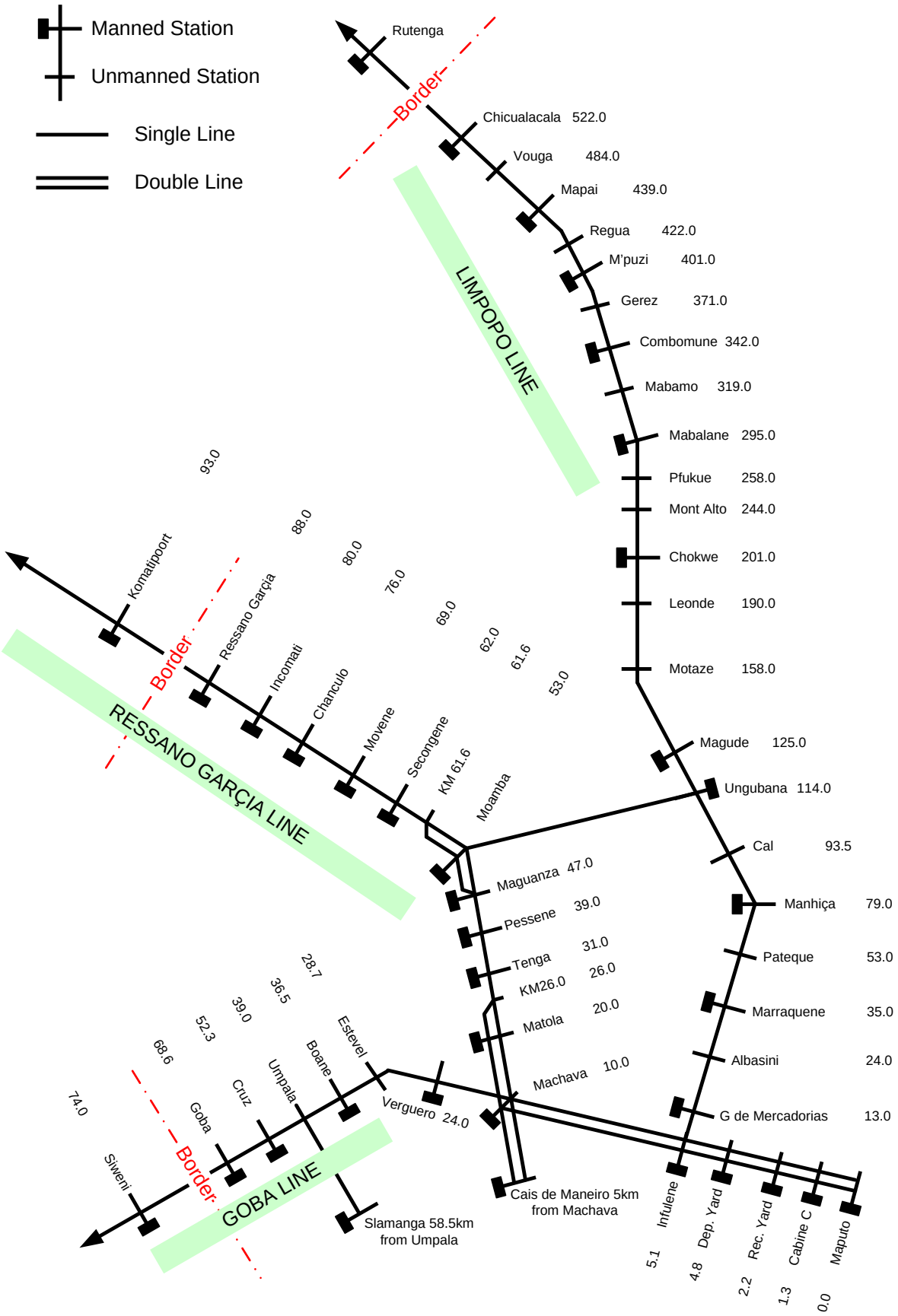


Figura 1.1: Rede Ferroviária do CFM Sul

Este sistema introduz limitações na operação ferroviária, nomeadamente:

a. Dependência de factores humanos, não oferecendo por este facto a segurança necessária para as operações ferroviárias.
b. Redução de canais horários, devido à proibição regulamentar de realização de comboios em sucessão (conhecido como exploração em regime de bloco orientável), resultando na redução da capacidade de transporte da empresa, com implicações directas no cumprimento de acordos comerciais, ou na incapacidade de assumir mais compromissos para aumento da carga a transportar.

1.2 Objectivos

Os sistemas de sinalização ferroviária são sujeitos a certos constrangimentos, relacionados com a operação, em especial nos casos de via única, que criam certos limites técnicos que envolvem outros problemas relativos a forma como as pessoas devem interagir. Isto exige a identificação de uma solução capaz de responder a esses requisitos de forma satisfatória, nomeadamente em termos de:

- estabelecer, assegurar e proteger a rota do comboio;
- permitir apenas um comboio em cada secção de linha;
- manter a rota até que o comboio passe a secção de forma segura ou parar, e
- minimizar o risco de um comboio entrar numa secção sem autorização.

Estabelecer, assegurar e proteger a rota são objectivos fundamentais, e não diferentes de qualquer outro “processo de controlo”.

Com esse efeito, e aproveitando-se de conceitos já desenvolvidos no ambiente ferroviário, tal como a linha telegráfica que outrora impulsionou sistemas de regulação ferroviária, o aparecimento de novas tecnologias de informação e comunicação, introduz novos conceitos de sinalização e comunicação ferroviária. Varias organizações que trabalham nesta área, desenvolveram conceitos e sistemas que dentre eles, destacam-se no mercado ferroviário o sistema ERTMS, com maior aplicação na Europa, os sistemas PTC e OTMS, que são conceitos que estão em desenvolvimento nos EUA e no resto do mundo. No geral, estes sistemas visam essencialmente a comunicação entre o agente regulador da circulação e os maquinistas, com o objectivo de transmitir informações auxiliares de exploração.

O objectivos desta dissertação são:

1. O aparecimento de novas tecnologias de informação e comunicação, permitiu uma grande proliferação de sistemas com capacidade de localização de comboios e também o aumento da segurança, com a possibilidade de transmissão de dados ou

voz para o maquinista. Isto, exige o estudo destes sistemas, e dentre eles identificar um sistema que possa servir os CFM Sul, com uma boa relação custo-beneficio.

2. Uma vez identificado o sistema de sinalização ou de telecomunicações, proceder-se ao seu dimensionamento, para determinar a infra-estrutura necessária para satisfazer as necessidades dos CFM.

1.3 Estrutura

Esta documento encontra-se estruturado em 6 capítulos organizados da seguinte forma.

No capítulo 2 são descritos e estudados os sistemas de sinalização (localização) existentes, e os sistemas baseados nos sistemas de comunicação. São apresentados os requisitos para o sistema do CFM Sul e por fim é identificado um sistema para estudo mais pormenorizado para implementação.

No capítulo 3 é feita a preparação da implementação, com o estudo dos modelos de propagação, e outros factores a considerar no desenho de um sistema de telecomunicações, tais como o balaço de potencia e analise de determinação do trafego a servir. Para além das considerações teóricas do processo, é feito uma identificação dos equipamentos capazes de suportar a rede proposta.

No capítulo 4 procede-se à escolha dos equipamentos e parâmetros a utilizar no dimensionamento da rede e são estabelecidos os critérios a considerar no processo de implementação.

No capítulo 5 é apresentado o estudo de cobertura da rede ferroviária do CFM Sul.

No capitulo 6, são apresentadas as conclusões desta dissertação, assim como, uma identificação do trabalho ainda a realizar para a efectiva implementação de um sistema de controlo de trafego na base do sistema de telecomunicações identificado.

Capítulo 2

Sistemas e Requisitos

Neste capítulo, faz-se uma revisão do estado de arte dos principais sistemas de comunicações e sinalização em uso na actualidade. Também é feita a identificação dos requisitos que servirão de base e referência ao objecto de estudo deste trabalho. Por ultimo, são descritos com algum detalhe os sistemas GSM-R e TETRA.

2.1 Sistemas de comunicação e sinalização ferroviários

2.1.1 Introdução

Em ferrovias, podem distinguem-se dois sistemas principais:

- Sistemas de Sinalização e Telecomunicações – que podem ser de sinalização electrónica, electromecânico, mecânica e a cabos de fibra de óptica.
- Sistema de segurança, comando e controlo.

A sinalização ferroviária tem como objectivos básicos, garantir o espaçamento entre comboios que circulam no mesmo sentido, impedir o acesso de 2 comboios que circulam no mesmo troco de via, e gerir pontos de conflito (aparelhos de mudança de via).

Um conceito importante em sinalização ferroviária, é o conceito de encravamento. O encravamento é o estado de um elemento de sinalização (sinal, agulha) que impede a mudança de aspecto ou posição do mesmo, enquanto estiver activo. A materialização dos encravamentos pode ser feita por elementos mecânicos, eléctricos ou electrónicos.

Outro aspecto importante na sinalização ferroviária, é a detecção de comboios, que consiste na colocação de equipamentos na via, que dão informação da presença de composições. Esta informação é essencial para garantir o seguimento dos comboios e para a materialização dos encravamentos. Neste tipo de equipamentos destacam-se os circuitos de via e os contadores de eixos. Contudo, também pode ser feito com base em sistemas de comunicações. É nestes últimos que iremos basear o nosso estudo, descrevendo de forma sumária os sistemas de comunicação que são usados em sistemas de sinalização.

2.1.2 Rádio convencional na banda dos 400 e 900 MHz

Os sistemas de rádio convencional são sistemas analógicos que não exigem investimentos avultados, têm capacidade de tráfego na ordem dos 19,2 kbps com possibilidade de gestão remota, e capacidade de formação de redes. A dificuldade nestes sistemas reside no facto de necessitarem de um grande número de frequências para a formação da rede e baixa confiabilidade para mobilidade, pois são originalmente desenvolvidos para redes ponto a ponto e ponto-multi-ponto [Katt04]. Pelo facto de serem sistemas analógicos, está-lhes associado o problema de qualidade do sinal, isto é, com o aumento da distância à estação base provoca uma degradação contínua do sinal recebido.

2.1.3. Sistema trunking MPT1327

Nos sistemas de *trunking* (sistemas de partilha de recursos), introduziu-se a primeira grande diferença em relação aos sistemas convencionais, que foi a utilização de um canal comum dedicado à sinalização entre o sistema e todos os utilizadores. A este canal chamou-se canal de controlo, sendo os restantes canais de tráfego [Katt04]. O canal de controlo (CC) é um canal de dados aos quais todos os terminais estão ligados quando em repouso, e através do qual trocam informações relativas aos procedimentos de estabelecimento de chamadas de entrada e saída. É através deste canal que são difundidas informações relativas às mensagens de estado e de texto, até 184 bits [Katt04]. O sistema permite ainda, de uma forma limitada, a interligação entre terminais móveis à rede PSTN (Public Switched Telefone Network). O CC funciona a 1200 bits/s, sendo os dados modulados em FFSK (Fast Frequency Shift Keying) numa sub-portadora de áudio antes da modulação na portadora final de RF (Radio Frequency). A transmissão de dados no CC é feita de forma síncrona no sentido descendente, e assíncrona no sentido ascendente. A forma de acesso no sentido ascendente é uma configuração "*Sloted Aloha*" com uma estrutura de tramas de dimensão variável mas múltipla na unidade básica de 128 bits e duração de 106,7 ms [Kett04].

De notar que neste sistema foi introduzido o conceito de base de dados central de assinantes, permitindo desta maneira implementar um sistema flexível com várias estações de cobertura. Quando um assinante se desloca para fora da sua estacão de cobertura informa o controlador central da sua nova posição, facilitando desta maneira o encaminhamento das chamadas de entrada e permitindo chamadas de saída fora da área.

A transmissão de dados nestas redes MPT 13xx, e em especial na rede MPT 1327, pode ser feita de duas maneiras. A primeira, através do canal de controlo, só é utilizada para mensagens curtas até 184 bits, enquanto a segunda é realizada através de um terminal de dados DTE ligado directamente ao rádio através de uma porta série e comunicação com este através do protocolo MAP27 (Mobile Access Protocol for MPT1327 equipament). Esta norma define as regras para estabelecimento de uma chamada, transferência de dados e controlo de dados pelo DTE (Data Terminal Equipament) [Kett04].

Este sistema, apesar de ter capacidade de transmissão de dados, é analógico e a qualidade de sinal não é constante.

2.1.4 Sistema TETRA

Utilizando-se a experiência ganha no desenvolvimento das especificações do sistema móvel GSM (Global Systems for Mobile Communications), a organização europeia ETSI (European Telecommunications Standards Institute) definiu especificações para um sistema rádio com

recursos partilhados que englobasse serviços de voz e de dados, TETRA (TErrestrial Trunked RAdio), e que servisse organizações de utilidade pública, nomeadamente serviços de segurança, emergência, transportes, etc.

Tal como o GSM, as especificações são de domínio público, dando assim possibilidade aos utilizadores de escolher os fornecedores de terminais e aos operadores os fornecedores de infra-estrutura que melhor lhes servisse.

Este sistema partilhado é totalmente digital e utiliza tecnologia TDMA (Time Division Multiple Access), orientado a voz e dados móveis. Tem um aproveitamento espectral permitindo transmitir 4 canais de voz ou dados por canal físico de RF.

O sistema TETRA utiliza uma estrutura de canais muito semelhante aos sistemas convencionais, nomeadamente canais de rádio com largura de 25 kHz, fornece os mesmos serviços básicos de voz que os sistemas convencionais, fornece todos os serviços básicos que todos os sistemas de gerações anteriores forneciam, acrescenta algumas facilidades básicas, nomeadamente a encriptação do áudio, e adiciona facilidades opcionais todas elas estandardizadas [Kett04].

Os serviços básicos de dados incluem mensagens curtas até 256 bytes, transmissão de dados em modo dedicado com velocidade de 2,4 a 28,8 kbps, e o serviço de dados de pacotes [Tetr10]

2.1.5. Sistema GSM-R

A norma GSM-R (Global System for Mobile Radio Communication for Railways) é uma extensão do GSM dedicada a aplicações ferroviárias, satisfazendo necessidades especiais em termos de funcionalidades deste tipo de aplicações com base numa tecnologia de acesso rádio bastante conhecida, e que já deu provas de robustez em aplicações móveis [Hile99].

Esta norma foi desenvolvida pela ETSI e no seguimento das recomendações dos órgãos reguladores do sector ferroviário, o GSM-R tem sido adoptado pela maioria dos operadores das infra-estruturas ferroviárias, para suporte das aplicações profissionais de voz e dados, existindo actualmente um adesão ao sistema e a migração dos sistemas analógicos para este padrão, em especial na Europa Ocidental [Hile99].

2.1.6 Sistema ERTMS

Tendo como objectivo a satisfação das especificações ferroviárias, em especial a segurança, a UIC (Union International des Chemins de Ferre) definiu uma série de especificações, tendo como base a norma GSM, que aumenta os requisitos em termos de

qualidade dos serviços das redes de rádio.

Esses requisitos são definidos para as linhas equipadas com ETCS (European Train Control System) nível 2, a qualidade de serviço e os respectivos procedimentos de teste e verificação baseadas na especificação UNISIG Subset-093 V 2.3.0, conforme com o disposto no documento O-2475 (ERTMS-GSM-R *Quality of Service Test Specification*), na última versão disponível (Versão 3.0 à data de elaboração do presente documento) [Eir06].

A interoperabilidade tem sido um dos grandes problemas na Europa, tendo levado países a desenvolver um sistema comum denominado ERTMS (*European Rail Trafic Manangement System*).

O ERTMS é uma inovação sistemática com o propósito de estabelecer um novo standard, permitindo remover facilmente as barreiras fronteiriças e aumentar a competitividade entre os corredores ferroviários.

O ETCS constituiu o novo sistema de controlo e comando de circulações, enquanto que o GSM-R constitui o novo sistema de comunicação de voz e dados. Assim, o ERTMS, é a conjunção do ETCS com o GSM-R.

Juntos, o ETCS e o GSM-R formam o ERTMS, ou seja o novo sistema de sinalização e gestão de tráfego ferroviário para a Europa, tendo como objectivos principais de funcionalidade os aspectos seguintes:

1. Comunicações ferroviárias – Assegurar uma operação segura dos comboios na sua rede;
2. Gestão de tráfego – Negociar com a gestão de tráfego e da infra-estrutura de modo a assegurar a possível optimização da capacidade das linhas e a utilização do efectivo do material circulante.

O ERTMS/ETCS tem três níveis definidos:

- Nível 1 - visa melhorar a segurança da circulação, aproveita a infra-estrutura existente (circuitos de via e sinalização lateral). Neste nível existe o EUROBALISE com ou sem permissão de ordem de frenagem.
- Nível 2 - é permitida a circulação sem sinalização lateral, utilizando-se a capacidade de detenção do sistema de via instalado e o controlo de velocidade do comboio através da utilização do sistema de transmissão rádio, de funcionamento semi-contínuo ou continuo. Tem como características básicas: ausência de sinalização lateral, autorização do movimento via rádio; detenção através do sistema de via; posição do comboio através das balizas; velocidade e frenagem e controlada por ETCS que prevê e controla a ultrapassagem da autorização do movimento.
- Nível 3 - é permitida a implementação do cantão móvel, através da utilização de do sistema de transmissão rádio de funcionamento semi-contínuo ou continuo, o qual

permite a detenção da posição do comboio e a supressão da sinalização lateral. Este nível tem as seguintes características: não existência da sinalização convencional, excepto aparelhos de manobras; autorização do movimento a base de cantão móvel via rádio, que inclui todo o sistema de *interlocking*; integridade e posição do comboio através de equipamento embarcado; correcção da posição do comboio, através de balizas fixas; velocidade e frenagem do comboio controlado por ETCS que previne a ultrapassagem da autorização do movimento [Eire06].

A implementação deste sistema requer componentes normalizados. O sistema ERTMS, foi desenvolvido baseando-se numa série de componentes normalizados cujo o funcionamento e especificações nas TSI (*Technical Specifications for Interopearbility*) e que juntamente com as suas especificações de provas formam parte das normas CENELEC (*Commitee Europeen de Normalisation Electrotechnique*) [Eire06].

Os elementos principais na via do sistema ERTMS são os seguintes: EUROBALISE nas suas variantes, de dados variáveis ou fixos; equipamento de ligação e encravamento LEU (*Lineside Encoder Unit*); RBC (*Radio Block Centre*). Os elementos principais a bordo, são o MMI (*Main Machine Interface*) e a Interface STM (*Specific Transmission Module*).

A ligação entre os elementos de via e os elementos de bordo é realizada através do módulo de comunicações EURORADIO.

2.1.7 Sistema OTMS

O sistema OTMS (*Optimised Train Manangement System*) surge devido ao custo bastante elevado de implementação do ERTMS, principalmente a componente de implementação do GSM-R, que é proibitiva para a maioria das ferrovias, em especial as de baixa carga e baixa densidade. É uma solução integrada de gestão, desenhada desde o inicio para ferrovias de baixa densidade. Esta solução contém todas as aplicações para as regiões onde existe equipamento de sinalização lateral, faltando o sistema de localização [MeLe10].

A Arquitectura do OTMS, consiste em:

- **Centro de controlo**

  O centro de controlo consiste em:

  1. Controlo Remoto – O sistema de controlo remoto é usado para prover o controlo da locomotiva, do número de comboio e reporte das condições de funcionamento. Faz a interface com o sistema SLS (*Saftey Logic System*). A informação que flui nele não é vital.
  2. *Safety Logic System* (SLS) – Tem funções de *interloking*, existindo duas opções de implementação: centralizado e descentralizado. Em todas as situações é implementado de forma electrónica.

a. *Interlocking* Centralizado e Sistema de Controlo de Comboio

Em caso de *interlocking* centralizado, todas as funcionalidades na linha são controladas por SLS. O número de estacões remotas é alocado ao SLS e na maior parte dos casos o SLS provê todas as funcionalidades requeridas.

b. *Interlocking* não Centralizado e Sistema de Controlo de Comboio

Em caso de *interlocking* não centralizado a funcionalidade é controlada pelo equipamento de via em todas as estacões. O SLS obtém comandos não vitais, uma cópia de comandos vitais e o estado do equipamento de via. A informação de *interlocking* recebida é utilizada pelo SLS para gerir as autorizações de movimento, através do sistema de telecomunicações.

- **Equipamento de via**

  O equipamento de via consiste em:

  1. Objectos controlados;
  2. Sistema de detenção de composições
  3. Sinais
  4. Agulhas
  5. *Tags*
  6. Redes locais

- **Equipamento embarcado**

  O equipamento embarcado consiste em:

  1. *Automatic Train Control* (ATC) – É responsável pela performance das funções de controlo de comboio, determinando a autorização do movimento, a velocidade máxima e o perfile de frenagem.
  2. *Onbord Computer* (OBC) – É uma peça opcional, utilizada para visualização da informação ao maquinista em relação as condições do tráfego de forma a optimizar a operação.
  3. *Driver-Machine Interface* (DMI) – É baseado em PC com um *display* LCD colorido. Há casos em que o DMI é o mesmo para o ATC e para o OBC.
  4. *Global Positioning System* (GPS) – É utilizado para prover informação precisa sobre a localização do comboio, que é usada para reportar a posição do comboio ao SLS para uso na indicação da ocupação de uma secção.
  5. *End of Train* (EOT) – É um sistema usado para confirmar se a composição se encontra completa. O sistema incorpora receptor GPS no último veículo. A informação é usada pelo SLS, para indicação de secção ocupada. A informação sobre a secção ocupada é usada para libertar ou ocupar itinerários ou secções durante o movimento.
  6. *Tags* e leitores de *tags* – *Tags* RFID (*Radio Frequency Identification*) são usados para transmitir dados quando expostos ao leitor de RF. A informação

contida nos *tags* pode cobrir o número único de identificação, informação sobre latitude e longitude.

7. Comunicações – As comunicações entre o comboio e o centro de controlo são efectuadas através de um sistema TETRA.

2.1.8. Sistemas PTC

Os sistemas de controlo de comboios têm sido utilizados para melhorar a segurança nos sistemas convencionais de controlo através da monitorização continua da posição do comboio e pela habilidade de forçar a paragem do comboio antes do obstáculo ou ponto que possa causar desastre. Desde essa altura, esses sistemas foram geralmente chamados *Positive Train Control* (PTC). Nos EUA, como forma de clarificação deste conceito, a administração federal dos caminhos de ferro definiu como sistemas PTC aqueles que simultaneamente tenham as características seguintes [Oatc10]:

1. Prevenção de colisão entre comboios;
2. Imposição de restrições de velocidade, incluindo restrições da linha (curvas, pontes, etc.) e precauções temporárias.
3. Prover protecção ao pessoal que trabalha na via, incluindo o equipamento através de ordens de avanço específicas.

Vários métodos de controlo de comboios tem sido experimentadas, baseados em informação não vital, informação vital e sistemas autónomos de informação vital. Os sistemas ICBS (*Interoperable Communication-Based Signaling*) são utilizados como sistemas autónomos baseados em informação vital[will09].

A AREMA (*American Railway Enginnering and Maintenance-of-Way Association*), desenvolveu um manual de boas práticas para os sistemas de sinalização baseados em sistemas de comunicação. Este manual, que demonstra como atingir os objectivos do PTC, é seguido no desenvolvimento de muitos equipamentos para sistemas vitais, e dessa forma obtendo-se a interoperabilidade[Will09].

A arquitectura e a filosofia utilizada no desenvolvimento do sistema CBS (*Communication-Based Signaling*) é em principio igual aos sistemas convencional excepto nos seguintes pontos[Will09]:

1. Blocos físicos (como os determinados por circuitos de via em sistemas convencionais). Neste caso, são substituídos por blocos virtuais geralmente equivalentes ao comprimento dos circuitos de via em áreas de domínio de um CTC (Centro de Trafego Centralizado).
2. As comunicações ao longo da linha são substituídas por *links* digitais de dados.
3. A localização do comboio é determinada por equipamentos embarcados na

locomotiva. Uma base de dados embarcada na locomotiva que é utilizada para prover toda a informação necessária para controlo da velocidade e de perfil de travagem e outra informação necessária. A Figura 2.1 a seguir mostra a arquitectura geral de um sistema CBS. A nuvem representa qualquer sistema de RF que tenha sido adoptado para enviar as mensagens predefinidas entre os diversos blocos.

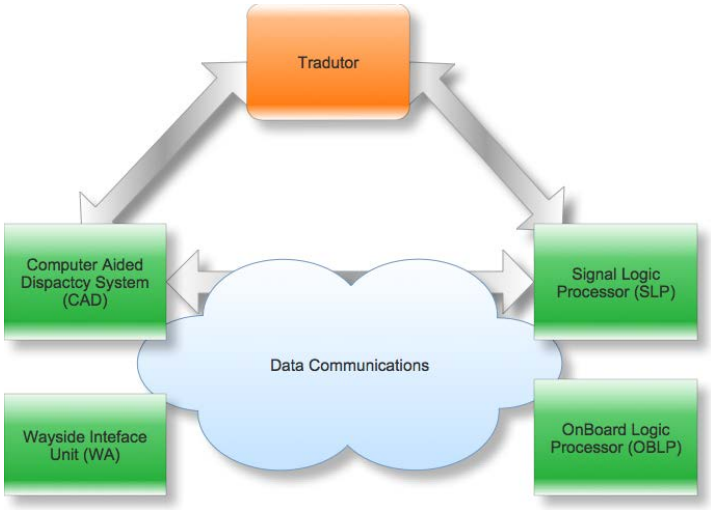


Figura 2.1: Diagrama do Sistema CBS (Extraída em[Will09]).

Em sistemas baseados em comunicações, o controlador envia pedidos a partir do computador de despacho CAD (Computer Aided Dispatch) na central. O processador de sinalização SLP (*Signal Logic Processor*) controla as alterações e estabelece rotas no momento tal como é feito num CTC convencional. Estas operações são realizadas usando informações vitais e princípios descritos no manual da AREMA. É importante notar que as solicitações realizadas a partir do CAD para o SLP não são parte do sistema vital, sendo apenas solicitações de acções que tenha sido levadas a cabo. As mensagens actuais não são executadas até que a informação vital com o SLP tenham concordado que devem ter lugar. Deste modo, as acções do SLP nesses pedidos, são feitos quando há necessidade de protecção e enviadas indicações a estação da CAD, quando a solicitação estiver completa. Nestes pedidos de controlo e indicação de mensagens entre o CAD e o SLP podem existir os mesmos tipos de controlo e mensagens dos utilizados em sistemas convencionais[Will09].

2.2 Requisitos para o sistema de telecomunicações

O CFM pretende estabelecer um sistema de sinalização baseado em rádio, isto é, com os conceitos de sistemas PTC acima descritos, com os seguintes requisitos operacionais do sistema rádio:

Implementar o sistema de sinalização em bloco ou cantão, entre os controladores de tráfego e os maquinistas. Os controladores irão transmitir as ordens de avanço aos maquinistas indicado o limite até aonde poderão se movimentar.

Implementar um sistema de controlo baseado em GPS (Global Positionig System), OBC (On-board Computer) e base de dados centralizada.

Para tal, O CFM-Sul, pretende implementar um sistema de Rádio Móvel Privado, basicamente para suportar as funcionalidades do sistema de sinalização PTC, conhecido por TWS (Track Warranty System) e prover comunicações de voz com os maquinistas (fall back mode) e também com as estações ao longo da linha, permitindo também a implementação de um sistema VOIP (Voice over Internet Protocol).

2.2.1 Requisitos básicos

O sistema rádio a implementar, deverá prover comunicações de voz e de dados a um mínimo de 2,4 kbps, e estar de acordo com as características seguintes:

a. Banda de frequências

   Preferencialmente, os grupos deverão ser de acordo com a recomendação UIC ORI 751-3, isto é, UHF de acordo com bandas UIC (*Quadri-frequencies groups*)

   MS Tx: 457,400 a 458,450 MHz, e

   BS Tx: 467,400 a 468,450 MHz (*A band*), ou

   BS Tx: 447,400 a 448,450 MHz (*B band*).

b. Tipo de transmissão:

   Analógica ou digital.

c. Modo de Acesso:

   Em caso de transmissão digital TETRA (ETSI), DMR (Digital Mobile Radio) de acordo com especificações ETSI ou APCO25 (Association of Public Safety Communications Officials, Project25) ou ainda um sistema de transmissão via rádio aplicável para o sistema ferroviário. É desejável que seja compatível em canal aberto com equipamento analógico desde que opere nas mesmas frequências.

d. Capacidade de operação em DMO (*Direct Mode of Operation*)

e. Potência de saída de 25 W

f. Frequência de recepção baseada no critério de melhor relação sinal/ruído.

g. Cobertura

O sistema de rádio deverá ser projectado de forma que garanta uma boa qualidade de transmissão e de recepção de voz e dados. As ligações rádio com as locomotivas deverão ser estabelecidas a partir das estações existentes ao longo das linhas. A cobertura deve satisfazer o mínimo de sinal requerido para recepção nos rádios da cabine, isto é, 1 µV sobre 95% da distância e 95% do tempo. As estações base deverão ter como sinal mínimo 2 µV.

h. Equipamento Móvel

O equipamento móvel de rádio, deverá estar adaptado ao ambiente ferroviário. O equipamento deverá ter robustez mecânica e suportar as vibrações da locomotiva. O equipamento deverá possuir controlos a partir de botões (*detachable control unit*). A selecção de canais deverá ser automática, podendo no entanto permitir uma comutação manual. O modo de acesso deverá ser compatível com o sistema adoptado. O equipamento deverá ser capaz de funcionar em canal aberto para propósitos de trabalhos de "manobras". O equipamento deverá ser equipado com interfaces de dados adequadas para interligação com equipamentos externos, tais como o OBC. Os equipamentos móveis poderão funcionar tanto em modo *Half Duplex* como em *Full Duplex*, com microfone de mão e botão de PTT. Os equipamentos móveis deverão estar equipados com altifalante e com cancelamento de ruído e botão PTT.

O sistema a instalar deverá indicar como os dados e a voz deverão ser utilizados, isto é, se em simultâneo ou em rajada de dados e pausas de voz. O sistema a instalar deverá prover mecanismos de verificação "escuta" das rajadas de dados durante as comunicações de voz.

O equipamento deverá funcionar com alimentação da locomotiva (*DC Voltage*). Em caso de necessidade de conversão DC/DC, deverá estar previsto um conversor com isolamento galvânico entre a entrada (*input*) e saída (*output*). A variação da tensão da locomotiva é de 50 V a 165 V.

A antena deverá ser do tipo "*low profile*" com protecção por redoma. Preferencialmente, deverá ser combinada uma antena de GPS e GSM. O equipamento de radiação (cabos, antenas e conectores) deverão ser adequadas para a cobertura desejada.

As estacões base deverão ser adequadas para instalações remotas. Preferencialmente em cabines de 19", devendo estar projectadas para utilização 24/7.

Os equipamentos deverão possuir interfaces IP, ou alternativamente utilizarem 4 interfaces E&M. Os equipamentos deverão prover gestão, configuração e diagnóstico remoto e ter protecção contra descargas atmosféricas.

As estacões base deverão estar equipadas com sensores específicos (porta aberta, alto VSWR, carga de bateria baixa) e manutenção adequada da rede.

2.2.2 Análise técnica

O sistema ferroviário do CFM-Sul é caracterizado por ser de baixo tráfego, com linhas (em especial no corredor do Limpopo) que possuem blocos de secção bastante longos e poucas estações (paragens). De principio, é fácil o controlador de tráfego fazer o despacho e o comando dos comboios, *on-line* e centralmente. A gestão dos comboios nas estações é feita localmente, e o regulador local pode intervir no sistema de *interlocking* da estacão, fazendo os ajustes necessários.

Com as características acima descritos, um sistema do tipo PTC, expansível, com tolerância a falhas, manutenção *on-line*, é o mais adequado para a malha em estudo. As propriedades de controlo automático e coordenação autónoma podem ser implementadas simultaneamente. De acordo com as características dos sistemas PTC, é desejável que o sistema de supervisão de comboios receba a informação remotamente, via sistema de comunicação de dados (*wireline* ou *wireless*). Esta informação deve incluir o estado de todos os componentes de via, e monitorar essencialmente o movimento dos comboios na linha. A posição do comboio deve ser dinamicamente exibida numa tela (ecrã ou projector) instalado na sala de comando central onde os controladores fazem os despachos.

O sistema de supervisão deve ser desenhado de forma a ser autónomo e preferencialmente centralizado, podendo ser descentralizar quando necessário. A Figura 2.2 mostra a configuração desejável para o sistema.

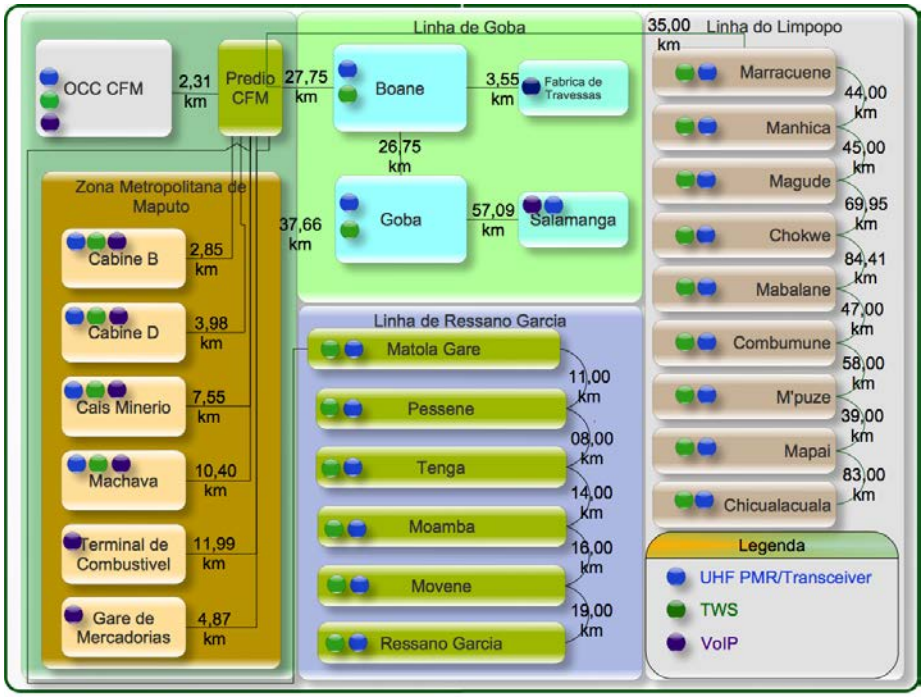


Figura 2.2: Configuração desejada para o sistema de comunicações.

A Arquitectura do sistema deve ser baseada em comunicações CBTC (*Communications-Based Train Control*) que monitora e controla os comboios usando comunicação RF. Centralmente consiste no subsistema de centro de despacho e o subsistema de locomotivas. O subsistema de centro de despacho, monitora e comanda as locomotivas e o equipamento ao longo da via. Dados bidireccionais poderão ser implementados via subsistema de comunicações.

2.2.3 Escolha de Sistema

O interesse do CFM-Sul é adoptar um sistema de comunicações que não exija investimentos avultados e tenha uma manutenção acessível, com características "*fail-safe*", alta disponibilidade e confiabilidade.

De acordo com os requisitos impostos, não parece racional a instalação de sistemas analógicos pelas razões já indicadas, devendo-se também acautelar alguns aspectos relacionados com o débito e disponibilidade.

As actuais comunicações são baseadas em VHF analógico, que não são capazes de atingir os novos requisitos operacionais. Assim, o novo sistema, para além dos requisitos indicados, deve ser capaz de ter:

- Capacidade e performance – Deve ser uma tecnologia digital, mas não em plataforma analógica.
- Transmissão digital de dados – a nova plataforma digital deve ser capaz de transmitir dados a velocidades a 4,8 kbps, e acima de 100 kbps. Sistemas analógicos são limitados a velocidades a volta de 2,4 kbps.
- Capaz de uma encriptação "forte", tanto a nível do *hardware* como da interface aérea, para prevenir que indivíduos não autorizados abusem das comunicações ferroviárias.

Dada as vantagens do digital sobre o analógico, que tem como o ponto máximo a capacidade de recuperação do sinal em condições de degradado, o que pode ser bastante vantajoso para este caso, dado as distancias envolvidas, conclui-se que um sistema digital deverá ser adoptado, no entanto, há que estudar a forma como ele poderá ser implementado. Olhando para a panóplia de tecnologias (digitais) de comunicações existentes, adicionando o requisito de se encontrarem já aplicadas em sistemas ferroviários, identifica-se o GSM-R e o TETRA. São estes os sistemas que serão objecto do nosso estudo.

2.3 GSM-R: Global System for Mobile Radio Communications for Railways

2.3.1 Características do sistema e da rede

GSM for railway (GSM-R) é um standard definido para uso do GSM em infra-estruturas de transporte ferroviário. O GSM-R implementa uma série de aplicações e requisitos para ambiente ferroviário, incluindo dados e voz acima de 350 km/h.

O GSM-R foi desenvolvido a partir de uma iniciativa da UIC, no início dos anos 90, no sentido de ser estabelecido um novo standard, de tecnologia digital para comunicações rádio em ferrovias, em substituição do standard analógico estabelecido nos anos 70 e definido na ficha 751-3 que opera na faixa dos 450 a 470 MHz, que apenas serviu de uma base comum para o desenvolvimento de sistemas proprietários, não tendo chegado a ser um verdadeiro standard, já que este sistemas, na sua grande maioria eram incompatíveis entre si. Este facto aliado à obsolescência em que estavam a cair os sistemas existentes e também da rápida obsolescência da tecnologia, foram os grandes motivos que levaram a UIC a iniciar o processo de desenvolvimento do novo sistema através do projecto EIRENE.

Em 1995, a ETSI reservou junto ao CEPT (European Conference of Telecommunications Administrations) duas bandas de frequências que passaram a ser conhecidas internacionalmente como para o sistema EIRENE, em TR 25-09 e que futuramente passou a chamar-se GSM-R [Hile99]: [876, 880] MHz (*uplink*) e [ETSI97] MHz (*downlink*).

Uma portadora de RF do GSM denominada ARFCN (Absolute Radio Frequecy Chanel Number) possui uma largura de banda de 200 kHz que, por meio da técnica TDMA, é subdividida em oito intervalos de tempo (*time-slots*). Esta banda, com capacidade de 19 ARFCNs, foi inicialmente destinada para uso exclusivo de comunicações e aplicações pelas empresas europeias de transporte ferroviário, em funções de coordenação e implementação de todas as actividades de operação e manutenção. A Figura 2.3, mostra as subdivisões da banda do GSM.

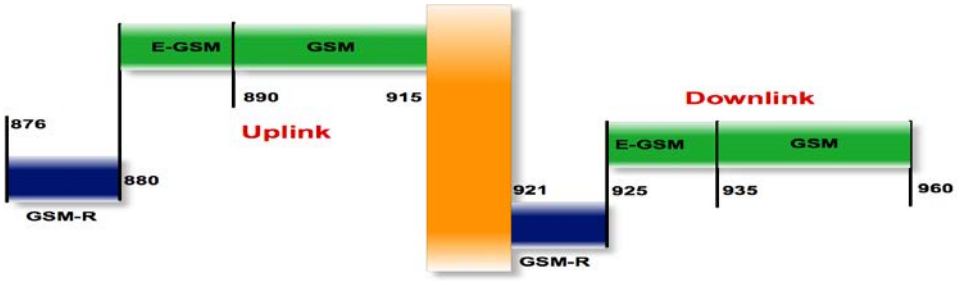


Figura 2.3: Alocação de Frequência na várias variantes do GSM

A definição e normalização dos requisitos que definem o GSM são provenientes das aplicações pretendidas e de acordo com a fase 2 e 2+ da normalização do GSM. A rede GSM-R deve cumprir integralmente as disposições obrigatórias incluídas nos normativos decorrentes das Especificações Técnicas de Interoperabilidade em vigor, nomeadamente as especificações FRS e SRS EIRENE na última versão [Eire06].

Estas exigências são mais ou menos aplicáveis para diferentes tipos de aplicações GSM-R. Tipicamente, a rede de GSM-R é projectada com várias células elípticas, ao longo da via, com antenas direccionais, orientada na direcção da via. Dentro das estacões ferroviárias é exigido um aumento do tráfego ("pontos quentes"), enquanto que as necessidades em termos de velocidade, são reduzidas. Por isso, tipicamente, em estacões ferroviárias maiores, teremos células sectorizadas [Eire06]. Em áreas menos populacionais, com vias de baixa velocidade e ligações de autocarro, apenas se necessita, em média, de uma ligação de voz. Estas células podem radiar como células omnidireccionais (áreas rurais sem ETCS).

Devido ao facto de o GSM-R ser baseado nas recomendações da fase 2 e 2+ do GSM, todas as principais configurações e descrições de interface não serão descritas aqui. A informação da funcionalidade do GSM convencional foi especificada na ETSI SMG, para a fase 2 e 2+, mas será completada de acordo com as necessidades surgidas.

A Figura 2.4 mostra a estrutura geral de uma rede GSM-R, mostrando os três grandes grupos da rede, o subsistema de transmissão, o subsistema de comutação e a componente de controlo da rede.

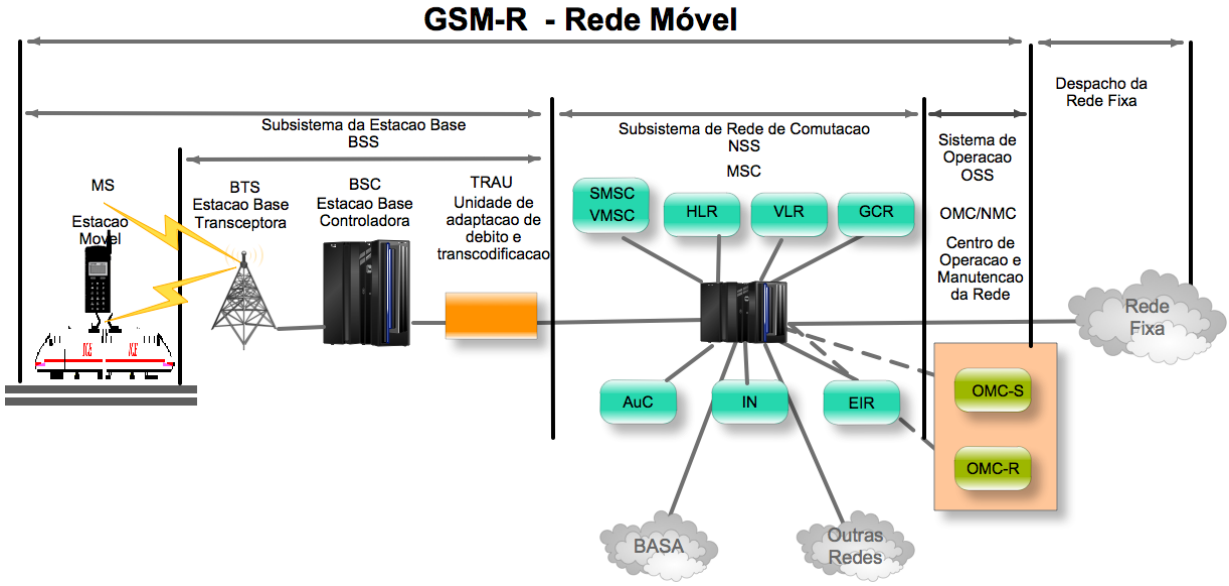


Figura 2.4: estrutura da rede GSM-R (Extraída de[Hile05]).

2.3.2 Cobertura e Qualidade de serviço

O nível mínimo de cobertura é de -95 dBm, com 95% de probabilidade, conforme especificação EIRENE para linhas equipadas com ETCS níveis 2 ou 3 e velocidades inferiores a 220 km/h. Este nível de cobertura será garantido independentemente de a opção ETCS ser nível 1 ou 2, uma vez que é o nível necessário para as comunicações com equipamentos portáteis, ou terminais equivalentes (classe 4), no exterior de veículos. Assim, uma eventual evolução de ETCS 1 para ETCS 2 numa determinada linha não implicará alterações de fundo na estrutura base da rede GSM-R, nomeadamente quanto à localização das BTS, mas apenas na sua capacidade e disponibilidade (redundâncias) [Eire06].

A Tabela 2.1, mostra os valores mínimos obrigatórios, para os níveis de ETCS a implementar, para o sistema de comunicações.

Tipo	Número mínimo	Utilização	Velocidade
Obrig.	38,3 dBμ/m (- 98 dBm)	voz e dados não críticos	-------
Obrig.	41,5 dBμ/m (- 95 dBm)	ETCS nível 2/3	≤ 220 km/h
Recom.	44,5 dBμ/m (- 92 dBm)	ETCS38 nível 2/3	≥ 280 km/h

Tabela 2.1: Especificações mínimas para cobertura GSM-R(Extraído em[Eire06])

As exigências de qualidade do GSM-R são baseados nas recomendações de QoS (*Quality of Service*) dos parâmetros do GSM. As exigências de QoS, mencionadas na Tabela 2.2, para ETCS mais rígido, estão em parte aprovados pelo MORANE (*MObile rádio for RAilway Networks in Europe*) e submetidas para validação. As exigências da QoS para outras aplicações ferroviárias estão abaixo destes valores.

Nas linhas equipadas com ETCS nível 2, a qualidade de serviço e os respectivos procedimentos de teste e verificação serão baseadas na especificação UNISIG Subset-093, V 2.3.0, e serão conformes com o disposto no documento O-2475 (ERTMS-GSM-R *Quality of Service Test Specification*), na última versão disponível (Versão 3.0 à data de elaboração do presente documento) [Eire06].

A Tabela 2.2, apresenta os parâmetros para os vários indicadores de qualidade da rede GSM-R.

Parâmetros de Qualidade	Valor Pedido	Probabilidade
Tempo de estabelecimento de chamada	6 s	95 %
Probabilidade de falha no estabelecimento da chamada	1 %	100 %
Falhas de transmissão	10^{-4}/h	100 %
Atraso na transferência de dados	450 ms	100 %
Duração das falhas de transmissão	1 s	100 %
Tempo de recuperação (sem distorção)	7 s	100 %
Coeficiente de erro	10^{-3}/h	100 %

Tabela 2.2: Parâmetros de QoS para o GSM-R (Extraído em[Eire06]).

A disponibilidade intrínseca nominal da rede GSM-R é, tipicamente, da ordem de 99.996% (indisponibilidade de 20 minutos por ano) nas linhas equipadas com ETCS 1 e de 99.998% (indisponibilidade de 10 minutos por ano) nas linhas equipadas com ETCS 2. A disponibilidade efectiva do serviço GSM-R (incluindo rede de transmissão, sistemas de alimentação, etc.) será dimensionada, e os respectivos mecanismos de redundância serão aplicados, de acordo com os objectivos globais de disponibilidade global do serviço ferroviário definidos caso a caso para cada linha[Eire06].

2.4 TETRA

2.4.1 Definição do sistema

TETRA (*TErrestrial Trunked Radio*, inicialmente conhecido como *Trans-European Trunk Radio*), é um conjunto de standards produzidos pela ETSI. Os standards do TETRA, descrevem em detalhe as interfaces do sistema TETRA, [Kett04].

O centro da rede TETRA é definido como infra-estrutura de comutação e gestão (SwMI). TETRA é um sistema digital TDMA de partilha de recursos, [Kett04].

2.4.2 Arquitectura da Rede

Os requisitos originais do desenho do standard do TETRA foram baseados nos princípios seguintes [DuGi99]:

- Operação totalmente digital, com óptimo aproveitamento do espectro e

capacidade;

- Estandardização completa da interface aérea e interfaces de rede de forma a oferecer todas as possibilidades de interoperabilidade
- Prover capacidade suficiente ao sistema de forma a acomodar as actuais necessidades e serviços ainda não identificados;

- O TETRA define seis tipos de interfaces que são definidos pelas funções lógicas e não do ponto de vista de construção física[DuGi99]. Todos os fabricantes podem desenhar sistemas diferentes de TETRA, baseados nos seus produtos e equipamentos. O único requisito para o sistema, é a capacidade de implementar todas as funções, descritas, provendo flexibilidade para os fabricantes. As interfaces standards, a definição lógica da comutação e a gestão da infra-estrutura (SwMI), juntos com os módulos dos subscritores móveis, formam a arquitectura da rede TETRA. Os interfaces são: I1 = Interface do sistema aéreo, I2 = Interface da estacão de linha, I3 = Interface de inter-sistemas, I4 = Interface do equipamento terminal (TE) para estacão móvel (MS) e a interface do equipamento terminal (TE) para estacão de linha (LS), I5 = Interface de gestão de rede, I6 = Interface do modo directo[DuGi99].

A Figura 2.5 ilustra a arquitectura da rede TETRA, que de forma diferente ao GSM, é definida apenas em termos de 6 interfaces [DuGirIr00]. Todas as interfaces definidas, requerem capacidade de interoperabilidade, interligação de rede e gestão de rede.

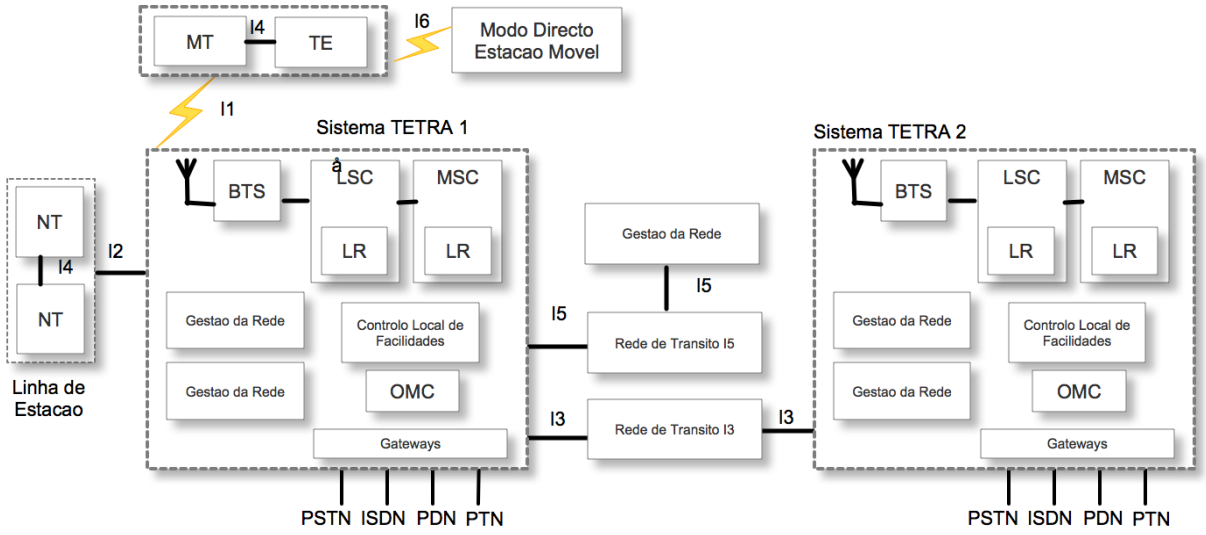


Figura 2.5 Arquitectura da rede TETRA e as interfaces definidas (Extraída de[DuGi99]).

2.4.3 Interface aérea

A interface aérea, que foi objecto de estandardização por parte da ETSI, provê as seguintes características [DuGi99]:

- Chamadas de despacho, também conhecidas como chamadas em grupo, chamadas privadas ou chamadas selectivas, chamadas telefónicas e um conjunto de standards ainda não aplicados.
- Serviços de dados curtos, que podem comportar dados do usuário acima dos 256 kbps.
- Série de serviços de dados, em circuitos ou em comutação de pacotes a “throughputs” desde 2,4 kbps com alto nível de protecção a 28,8 kbps para transferência de dados protegidos.
- Registo (autenticação) quando o SwMI localiza o MS dentro da área de serviço.
- Capacidade de segurança e autenticação.

A interface do modo directo é uma ligação digital de rádio, que permite que subscritores se comuniquem directamente entre eles, sem precisarem da infra-estrutura de SwMI. Este modo provê os seguintes serviços:

- Chamada privada
- Serviço de dados curtos
- Pode ser configurado como *gateway* de móveis
- Pode ser configurado como repetidor rádio de forma a estender o raio de cobertura

Tal como nos requisitos dos sistemas analógicos de partilha de recursos, a interface aérea do TETRA tem os mesmos requisitos em termos de fiabilidade, simplicidade e eficiência na transferência da sinalização e tráfego de dados. De forma a que se atinjam os requisitos, a interface a adoptou uma arquitectura em camadas conforme as divisões definidas pela OSI no seu modelo de 7 camadas.

A interface aérea do TETRA é dividida de forma vertical, em pilha de protocolos, do plano de controlo (*C plane*) e plano do usuário (*U plane*). O *C Plane* lida com a informação de controlo e comutação de circuitos, voz e dados do utilizador. O *U Plane* provê serviços do nível um e da parte mais baixa do nível dois, e se for necessário, provê serviços do nível três.

A Figura 2.6 mostra o *stack* de protocolos do AI [ETSI10].

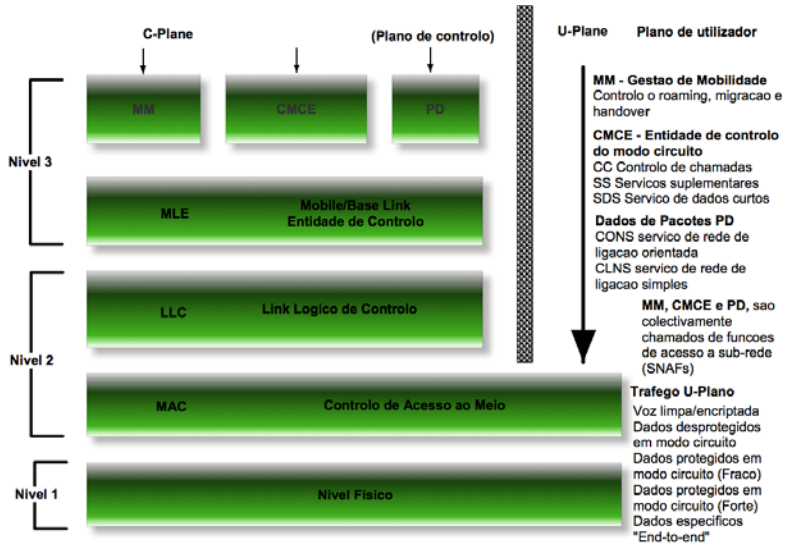


Figura 2.6: Stack de Protocolos do AI para MS/BS(Extraída de[DuGi99].

A seguir, temos a descrição da pilha de protocolos para a interface aérea.

a) Nível um - A interface aérea do TETRA neste nível consiste nas funções do nível físico, relacionadas com o tempo das tramas e funções de RF do rádio.
b) Nível dois - Nível 2.1, Nível de controlo de acesso ao meio (MAC) e Nível 2.2, Nível do controlo da ligação lógica (LLC)
c) Nível três - Cumpre com as seguintes três funções: conexão orientada ao protocolo de rede e o especifico protocolo de conexão (CONPS/S-CLNP). Esta é a entidade de dados (PD), entidade de controlo de modo circuito (CMCE) e gestão de mobilidade (MM) [ETSI10].

Em sistemas TETRA, o modo tradicional de circuitos, é conhecido por modo *trunked* (partilha de recursos). Este é o modo em que a rede estabelece um circuito ou escolhe o canal entre os utilizadores participantes ou envolvidos na comunicação. Quando o canal é estabelecido, permite transmissão simultânea, voz e dados. O conceito de *trunked* é muito essencial para uma análise mais profunda da interface aérea do TETRA.

2.4.4 Mecanismos de Transmissão

A estrutura do TDMA do TETRA é de 255 bits, abrange o *sub-time slot* e o *time-slot*, e a trama TDMA consiste em quatro *time-slots*. A trama TDMA é a estrutura básica de transmissão do protocolo da interface aérea, com uma duração de 56,67 ms, correspondendo a um *time-slot* de 14,167 ms. Dezoito tramas TDMA compõe uma multi-trama, e seis multi-tramas compõem uma hiper-trama. Comparado com o GSM, o TETRA tem um trama cuja duração é metade da do GSM, que consiste em oito *time-slots*, devido ao facto de que o esquema de modulação π/4 DQPSK adoptado pelo TETRA não permitir os

dados a uma velocidade de 7,2 kbps em todos os *time-slots*. A maior parte dos dados é enviada a 36 kbps numa largura de banda de 25 kHz.

O mecanismo de transmissão é provido por canais físicos que são identificados no standard TETRA como canais físicos de controlo (CP) e canais físicos de tráfego (TC). Os canais lógicos, tais como os canais de tráfico (TCH) ou canais principais de controlo (MCCH), são mapeados para cima dos canais físicos de acordo com o modo de operação. O MCCH é chamado de *carrier* principal e todas as células tem o MCCH no slot 1 designado CP. O estudo dos canais de controlo é necessário quando se pretende considerar os requisitos da interface aérea para transmissões TETRA SDS [DuGi99].

No domínio da frequência, é usual ter vários portadoras, e a cada uma deles é atribuído um número do canal de comunicação [DuGi99].

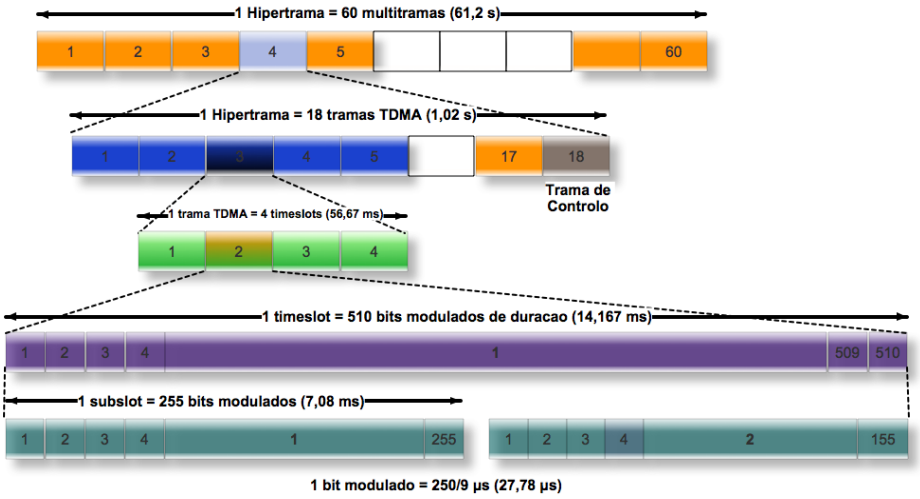


Figura 2.7: Estrutura do TDMA do TETRA (Extraída de[DuGi99]).

2.4.5 Bandas de frequências

O TETRA é um sistema FDD (Frequency Division Duplex), com bandas diferentes de transmissão e recepção. A separação *duplex* (entre transmissão e recepção) é de 10 MHz, excepto na banda dos 900 MHz que deve ser de 45 MHz [DuGi99]. A banda de frequências em TETRA vai dos 150 MHz a 900 MHz, divididas em portadoras de *uplink* e *downlink* alocadas em pares. O CEPT, recomenda vários grupos frequências, Tabela 2.3, mostra o grupo de frequências aplicáveis em sistemas TETRA.

A modulação π/4DQPSK permite ao TETRA um uso altamente eficiente do espectro, mas requer alta linearidade para todos os componentes de RF, especialmente o amplificador de

potência RF.

Grupos de Frequências em TETRA		
380-390 MHz	**390-400 MHz**	**Salvação pública**
410-420 MHz	**420-430 MHz**	**Uso comercial**
450-460 MHz	**460-470 MHz**	**CEPT (uso comercial)**
870-888 MHz	**915-993 MHz**	**CEPT (uso comercial)**

Tabela 2.3: Grupo de frequências para TETRA, recomendadas pelo CEPT.

2.4.6 Capacidade do sistema

A capacidade do *uplink* em MCCH (Main Control Chanel) pode ser derivada do facto de que uma portadora por célula é dedicada ao MCCH de tráfego no sentido do *uplink*, e como existem quatro *time-slots* em cada trama, isto significa que em operação normal, o primeiro *time-slot* em todas as tramas é alocado para propósitos de controlo. Todas as tramas têm exactamente um CP e três TPs. Por conseguinte, na análise da capacidade do MCCH, faz-se apenas no sentido do *uplink*, de forma a facilitar posteriores análises de tráfego [DuGi99].

2.4.7 Serviços de Dados

Em TETRA, a utilização de dados cresceu de forma elevada enquanto a voz permanece apenas como a forma primária de comunicação. O motivo principal para o aumento de forma elevada da utilização de dados é a necessidade de uso de aplicações que permitem o aumento de produtividade, eficiência na operação e custos efectivos.

O Standard TETRA especifica que o serviço de mensagens curtas SDS (Short Data Service), deve ser implementado para transmissões e comunicações ponto-a-ponto e ponto-multiponto. As mensagens dentro do SDS estão divididas de tipo 1 – 4, as quais são categorizadas em termos de quantidade de dados, isto é, de 16 bits a 2039 bits. O comprimento de SDS-1, SDS-2 e SDS-3 está especificado no standard do TETRA como 16 bits, 32 bits e 64 bits respectivamente. Os serviços de suporte SDS provêm uma entrega segura dos dados do utilizador e podem ser utilizados de forma efectiva pelos serviços de transporte de dados para garantir que aplicações ao nível de inter-operabilidade quando usam mensagens SDS, um cabeçalho de informação é adicionado e deve ser implementado de forma a suportar a camada de transporte SDS (SDS-TL) e serviços de transferência de dados [ETSI10]

O TETRA provê serviços de pacotes da dados IP, de forma similar ao GSM. Um *time-slot* pode prover suporte de dados a 7,2 kbps por pacote, mas pode ir a velocidades entre 2,4 e 4,8 kbps, dependendo do nível de protecção utilizado. Os valores acima indicados, são suficientes para serviços como WAP (Wireless Application Protocol), *e-mail* e imagens comprimidas ou vídeo a baixa velocidade [DuGi99].

2.4.8 Parâmetros gerais do sistema

Os parâmetros gerais do sistemas estão na Tabela 2.4.

Parâmetros do Sistema	Valores dos parâmetros e/ou descrição
Espaçamentos de portadoras	25 kHz
Acesso múltiplo	TDMA
Canais (time slots) por portadora	4
Largura de banda do canal de tráfego	25 kHz = 6,25 kHz para V+D e DMO; 25 kHz para PDO
Duplicação e offset	FDD, 10 MHz
Alocação de frequências	380-400 (sistemas de segurança pública); 410-430 (sistemas comerciais)
Formato da modulação digital	π/4 DQPSK
Debito binário	18 k símbolos/s (36 kbps)
Debito binário (Rede)	Acima de 7,2 kbps por slot (28,8 kbps por portadora)
Esquema de acesso aleatório	Slotted Aloha
Multiplexagem estatística PDO	Transferência rápida de pacotes (<100 ms por octeto)
Tempo de estabelecimento de chamada	<0,3 s (<1 s)
Tipo de ligação de chamada	Ponto-a-ponto (individual); ponto-multiponto (chamadas em grupo); ponto-multiponto (chamada de broadcast)
Modos de ligação de chamadas	Normal e chamadas em fila (quando ocupado ou quando não responde)
Decisão de *handover*	Baseado no móvel
Encriptação	Standard da interface aérea encriptado; opcional “end-to-end”
Codificação de voz	Codec ACELP de baixo debito a 4,6 kbps;
Serviço de dados	Modo de circuitos, modo de pacotes, SDS
Serviços suplementares	30 no total; cerca de 30 são para uso em segurança e emergência

Modo do circuito do equipamento / usuário terminal	TE1-ISDN (V+D LS); TE2 (V+D MS e LS e DMO)
Modo de pacotes do usuário terminal	TE2 e TE3 (V+D e terminais de dados PDO)
Classes de potência dos móveis	1W (30dBm) a 3W (35dBm), 10W (40dBm), 30W (45dBm)
Nível de potência de *uplink* para móveis	0,03W (15 dBm) a 30W (45 dBm) em escalas de 5 dB dependendo da classe de potência do móvel
Sensibilidade do receptor para 2% de BER	-104 dBm (portátil); -107 dBm (móvel montado no veículo)
Classe de potência da estacão base	0,6W (28 dBm) a 40W (46 dBm) em 10 níveis
Níveis de potência de *downlink*	28 dBm (0,6W) a 46 dBm (40W) em e dB de nível dependendo da classe de potência da estação base
Velocidade do veículo	Acima de 200 km/h
Tamanho das células	Acima de 60 km para área de cobertura

Tabela 2.4: Sumário dos parâmetros de TETRA(Extraído em[DuGi99])

2.4.9 Potenciais aplicações ferroviárias

Como foi visto, a interface aérea do TETRA provê um rápido acesso ao sistema. A maneira com que o faz permite que seja adequado a muitas aplicações PMR e ferroviárias. O sistema TETRA pode prover serviços para a ferrovia nos casos seguintes:

- Despacho via comunicações sem fio. Desde que seja devidamente planificado, diferentes tipos de mensagens de voz para diversos grupos no sistema ferroviário podem ser partilhados, promovendo uma utilização racional do espectro, eficiência e produtividade [weHu02].
- Números dos comboios podem ser facilmente reconhecidos a grupados de forma dinâmica. Mensagens curtas podem ser enviadas com os códigos dos números dos comboios [WeHu02].
- Um controlo remoto dos comboios pode ser efectuado e em casos de emergência o TETRA transmite de forma instantânea mensagens de controlo e frear a locomotiva [WeHu02].
- A possibilidade de transmissão de dados a 36 kbps, permite que em caso de anomalias, imagens possam ser capturadas, comprimidas e enviadas via sistema TETRA ao CCO [WeHu02].

2.5 Comparação do TETRA com o GSM-R e Escolha do Sistema

A estrutura básica de todos os modernos sistemas digitais de comunicações é bastante similar, podendo isto ser verificado na comparação entre o TETRA e o GSM-R. O que torna o TETRA diferente do GSM-R é basicamente o tempo de estabelecimento de chamada, inferior a 300 ms. No entanto, as facilidades de chamadas em grupo que são uma exigência de determinados serviços, em especial o ferroviário, estão patentes nos dois sistemas.

Outras diferenças não pouco importantes, estão no modo funcional e no nível de infra-estrutura que deve ser concebida para cada sistema. No entanto, como sistema ferroviário, o TETRA, a nível da sua interface aérea, provê protocolos que habilitam a um acesso rápido ao sistema. Esta capacidade é básica aos sistemas ferroviários onde uma chamada não deve esperar por muito tempo. Sem deixar de ter em conta o sistema GSM-R, o TETRA, é um sistema desenvolvido para aplicações PMR, que são aquelas de que o CFM necessita, sem fazer grandes investimentos em infra-estruturas, e permite o aproveitamento da infra-estrutura já existente. As Tabelas 2.5, 2.6 e 2.7 comparam os dois sistemas em diversos aspectos e as suas vantagens e desvantagens tecnológicas a nível ferroviário.

Características	**GSM-R**	**TETRA**
Controlo de comboio	sim, ERTMS/ETCS, na Europa	sim, quando requisitados
Controlo remoto	sim	sim
Mensagens curtas + Paging	sim, SMS	sim, SMS
Reservas horários	sim, WAP	sim, WAP
Bilhetes/Pagamento electrónico	sim, eWallet	sim
Relatórios, Relatórios de vandalização	sim, SMS	sim, SMS
Diagnostico	sim, WAP	sim, WAP
Aluguer/logística	sim, WAP	sim, WAP
Gestão de energia	sim, TCP/IP	sim, TCP/IP
Comunicações locais nas estações e depósitos	sim, SMS	sim, SMS
Comunicações fora de área do serviço	sim, SMS	sim, SMS
Wireless intranet/Internet	sim, GPRS	Possível
Escritório móvel	sim, GPRS	Possível
Evolução	EDGE, 3G, WD-CDMA	Sim, TETRA release 2

Tabela 2.5: Comparação do GSM-R e TETRA a nível dos serviços de dados.

Características	GSM-R	TETRA
Controlo das comunicações com o maquinista	sim	sim
Manobras	sim	sim
Comunicações em grupo	sim	sim
Chamadas de emergência Estações/Paragens	sim	sim
Comunicações locais nas estações e depósitos em canal comum	sim	sim
Comunicações fora da área de serviço	Sim. Quando em roaming com o serviço público	Apenas nas áreas cobertas

Tabela 2.6: Comparação de GSM-R e TETRA a nível do serviço de voz.

Sistema	Vantagens	Desvantagens
TETRA	• Tecnologia mundial em crescimento e com muito suporte. • Possível implementar aplicações ferroviárias • Provê serviços de voz e dados • Provê controlo de usuários • Contem serviços especiais • Não necessita de estações base nas comunicações directas entre dois terminais • Uso de espectro que neste momento não se encontra ocupado em Moçambique.	• Requer instalação de infra-estrutura que pode vir a ser dispendiosa. • Células com cobertura acima dos 60 km de raio.
GSM-R	• Tecnologia mundial e standard para gestão ferroviária na Europa • Optimizado para serviços ferroviários. • Provê serviços de voz e dados	• Requer uma instalação de uma infra-estrutura dispendiosa • Células limitadas a 35 km de raio de cobertura • Caro para instalar • Sem espectro reservado para o caso de Moçambique

Tabela 2.7: Vantagens e Desvantagens comparativas TETRA vs. GSM-R.

Após analise dos dados acima colocados, permite-nos concluir que o sistema TETRA, é o mais adequado para as condições atuais do CFM-Sul.

Capítulo 3

Análise da Implementação

Este capítulo estuda os modelos de propagação aplicáveis para a rede que se deseja implementar, analisa as equações de balanço de potencia e a metodologia da definição do trafego do tráfego a servir. É feito um estudo sobre o equipamento que pode responder aos requisitos da rede.

3.1 Balanço de potência (Ligação)

No sistema TETRA, para cálculo de potência nos terminais do receptor, as perdas de percurso usadas no cálculo do *link budget* são indicados a seguir. A Figura 3.1 mostra as componentes do *link budget*, onde o ganho da antena é assumido como positivo; contudo o ganho da antena dos equipamentos portáteis pode ser negativo [ETSI97].

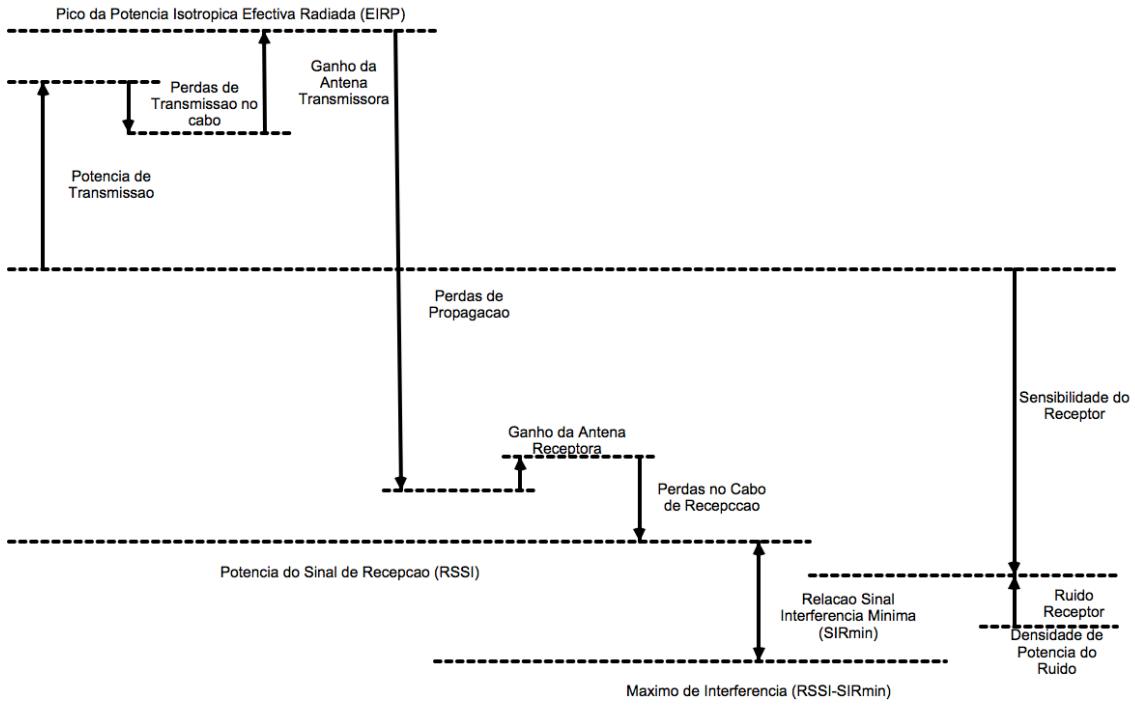


Figura 3.1: Link budget (Extraído de[DuGi99]).

As componentes do *link budget* são complexas. A potência de transmissão é geralmente definida como a potência de transmissão do amplificador. Alguma parte do sinal é perdida no cabo da antena. A sensibilidade do receptor depende do nível do ruído, e o ruído no receptor vai depender do tipo de receptor. O valor pelo qual a potência do sinal de recepção excede a sensibilidade do receptor define a margem da potência no *link budget* em relação ao desvanecimento. Se o desvanecimento for superior a este valor, a performance do sistema será má ou mesmo inexistente [DuGi99].

A atenuação da propagação, é dada por:

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

onde:

- $P_{e[dBm]}$: potência de emissão nos terminais da antena
- $G_{e[dBi]}$: ganho na antena de emissão

- $P_{r[dBm]}$: potência disponível na recepção aos terminais da antena
- $G_{r[dBi]}$: ganho da antena de recepção

O cálculo da EIRP depende do sentido da ligação:

- No sentido descendente,

$$P_{EIRP[dBm]} = P_{Tx[dBm]} - L_{c[dB]} + G_{e[dBi]} \quad (3.2)$$

onde:

  - P_{Tx}: potência de saída do emissor
  - G_e: ganho da antena de emissão
  - L_c: perdas no cabo entre o emissor e a antena

- No sentido ascendente,

$$P_{EIRP[dBm]} = P_{Tx[dBm]} + G_{e[dBi]} - L_{u[dB]} \quad (3.3)$$

onde

- P_{Tx}: potência de saída do emissor
- G_e: ganho da antena de emissão
- L_u: perdas devidas a presença do utilizador

Após o cálculo do balanço da potência, devem ser contabilizadas todas as margens devidas ao desvanecimento, penetração de interiores e outras:

$$M_{[dB]} = M_{FSF[dB]} + M_{FFF[dB]} + L_{int[dB]} \quad (3.4)$$

onde

- M_{FSF} :desvanecimento lento
- M_{FFF} :desvanecimento rápido
- L_{int} :penetração de interiores

A atenuação total fica:

$$L_{ptotal[dB]} = L_{p[dB]} + M_{[dB]} \quad (3.5)$$

3.2 Caracterização do desvanecimento

Desvanecimento ou *fading* é o nome dado para se caracterizar o fenómeno da existência de

variações aleatórias da intensidade de sinal recebido ao longo do tempo. Essa variação é considerada na análise dos sistemas, e é conhecida como atenuação suplementar tendo, portanto, como referência, o valor de campo em espaço livre.

Os desvanecimentos são normalmente classificados em rápidos e lentos [Corr09]. Embora não exista uma regra definida para essa classificação, pode-se indicar, genericamente, que os desvanecimentos lentos correspondem a variações de poucos dB por minuto na intensidade do sinal, enquanto que os desvanecimentos rápidos podem corresponder a variações de dezenas de dB em segundos. O desvanecimento tem várias causas, sendo para as comunicações móveis a principal causa a variação das perdas por difracção devido à movimentação do terminal.

3.2.1 Efeito Doppler

Como é sabido, o movimento relativo entre o transmissor e o receptor, produz uma aparente alteração da frequência, conhecida como efeito Doppler. O efeito Doppler depende também do ângulo especial de chegada do sinal [GaLe08], podendo ser descrito por:

$$f_D = \frac{\vartheta}{\lambda}\cos\theta \tag{3.6}$$

onde υé a velocidade, λo comprimento de onda e θ o ângulo entre a direcção de deslocamento da onda transmitida e o receptor. A Figura 3.2, descreve o efeito Doppler, conforme o móvel se desloca ocorre uma mudança no ângulo de recepção e na velocidade do móvel [GaLe08].

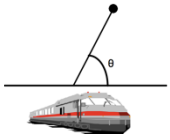


Figura 3.2: Ilustração do efeito Doppler

A máxima alteração da frequência (f_m) ocorre quando as comunicações (entre locomotivas) ocorrem no sentido oposto (α=0) em relação a linha recta. Neste caso, $\mathbf{f_m} = \pm\frac{\vartheta}{\lambda}$. O movimento na direcção do sinal de recepção, deslocamento positivo, aumenta a frequência de recepção. Caso o receptor se afaste do transmissor, ocorre um deslocamento negativo, que resulta na diminuição da frequência de recepção.

Como resultado de existência de “várias ondas” vindo em diferentes direcções, a frequência de desvio pode variar de acordo com cada uma das ondas que chegam, pelo que o espectro de Doppler não é uniforme [GaLe08].

Em caso de radiação isotrópica, o espectro pode ser dado pelo modelo de Jakes [GaLe08].

$$D(f) = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{f}{f_m}\right)^2}} \tag{3.7}$$

A aproximação (3.7) não é valida em presença da linha de vista (LOS – *Line of Sight*); neste caso, o espectro deve incluir a função δ, que pode ser dada como [GaLe08]:

$$D(f) = \frac{0.41}{2\pi\sqrt{1-\left(\frac{f}{f_m}\right)^2}} + 0.91\delta(f-0.7f_m) \tag{3.8}$$

Para a nossa situação, três cenários podem ocorrer:

1. Comboio na estação: normalmente a estrutura permite a linha de vista, contudo a velocidade é menor que os 20 km/h, levando a variações não perceptíveis (alguns Hz), portanto, desprezíveis.
2. Comboio em zona de manobras: este caso, é semelhante ao anterior.
3. Comboio em plena via: neste caso, para a situação da infra-estrutura do CFM, a velocidade máxima admissível é de 60 km/h; e portanto a variação é desprezável.

Assim, para efeitos de dimensionamento do nosso sistema, o efeito de Doppler não será tido em conta.

3.2.2 Desvanecimento lento

O desvanecimento lento, também conhecido por desvanecimento por atenuação, ocorre principalmente quando o nível do sinal recebido permanece abaixo do limar especificado (P_{min}) em intervalos de tempo que podem ir até vários segundos. O fenómeno é causado por sombreamento do sinal transmitido, devido a grandes obstruções como construções e relevos localizados entre o transmissor e o receptor. Outras causas comuns são a absorção atmosférica e mudança na trajectória de propagação [Corr09].

Consideram-se as propriedades do desvanecimento lento associados a uma Distribuição Log-Normal e existente nos trajectos com propagação por difracção ou mesmo de dispersão troposférica [Corr09]:

- Potência média no receptor, $\overline{P_r}$
- Desvio padrão no ambiente (neste caso consideramos o ambiente suburbano), σ, que é dado por:

$$\sigma_s(f)_{[dB]} = 0.98\log^2(f_{[Mhz]}) - 3.40\log(f_{[Mhz]}) + 11.88 \tag{3.9}$$

O nível do sinal a uma distância R da estacão base com sinal superior a P_{min} é dada por:

$$F_{circ}(P_{min},R)=\Pr ob(P_{rR}>P_{min})=\frac{1+erf\left(\frac{\Delta P_{[dB]}}{\sqrt{2}\sigma_{[dB]}}\right)}{2} \tag{3.10}$$

com $\Delta P_{[dB]}=\overline{P_{rR}}-P_{min}$.

A margem de desvanecimento vem portanto

$$M_{SF}=\Delta P \tag{3.11}$$

3.2.3 Desvanecimento Rápido

O desvanecimento rápido, também chamado de desvanecimento de multipercurso ou por interferência, caracteriza-se por variações bruscas no nível de sinal, devido a captação de diversos sinais com fases aleatórias [Corr09]. As flutuações do sinal neste caso são de curta duração, desde alguns micro segundos até alguns segundos. Num sistema de comunicações digitais, o desvanecimento rápido ocorre quando a resposta do canal muda durante o intervalo de símbolo.

Considerar-se as propriedades do desvanecimento rápido e multipercurso, relacionadas com as Distribuições de Rayleigh e de Rice. A função de distribuição probabilidade de Rayleigh é:

$$P(E)=1-e^{-E^2/\overline{E}^2} \tag{3.12}$$

onde $E^2/\overline{E}^2$, representa o desvanecimento rápido, logo:

$$-\mathrm{E}^2/\overline{\mathrm{E}}^2=\ln(1-\mathrm{P}) \tag{3.13}$$

De acordo com a distribuição de Rice, o parâmetro K é

$$K_{[dB]}=10\log(x^2/\overline{x}^2) \tag{3.14}$$

Assim:

$$M_{FF}=10\log\left[-\ln\left(1-P\right)\right] \tag{3.15}$$

3.2.4 Área de cobertura

A previsão da percentagem da área de cobertura de uma estação base, é um parâmetro

importante para a determinação da qualidade do serviço [Corr09]. Esta previsão, é considerada como apresentando uma Distribuição Log-Normal com a distância e assume-se como conhecidos os seguintes parâmetros [Corr09]:

- Potência média no receptor, $\overline{P_r}$
- Desvio padrão no ambiente, σ

Tomando um circulo de raio R, a percentagem de área coberta vem:

$$F_{area} = \frac{1 + erf(a) + e^{(2ab+1)/b^2}\left[1 - erf\left(\frac{ab+1}{b}\right)\right]}{2} \tag{3.16}$$

onde

$$a = \frac{\Delta P_{[dB]}}{\sqrt{2}\sigma_{[dB]}}$$

$$b = \frac{10n\log(e)}{\sqrt{2}\sigma_{[dB]}}$$

3.3 Modelos de Propagação

3.3.1 Considerações gerais

Modelos de propagação adequados são necessários para um cálculo efectivo da cobertura do sinal e análise da interferência. Para permitir comunicações eficientes, é necessário uma cobertura apropriada do sinal de rádio e prover capacidade suficiente ao sistema.

O sistema TETRA opera normalmente em modo de partilha (*trunk mode*). Situações de emergência podem ocorrer em determinadas áreas onde o sinal de rádio não existe; em alternativa, as comunicações vão ocorrer em modo directo (DMO). Nestes casos, modelos de propagação em DMO, ainda não foram suficientemente investigados e o standard TETRA recomenda modelos tais como o FSL e CEPT SE21, que são aplicáveis para casos de distâncias entre o emissor e receptor menores ou iguais a um quilómetro ou em áreas abertas [ETSI00].

O modelo de propagação no espaço livre, serve de base para entender os modelos mais avançados.

$$L_{0[dB]} = 32.44 + 20\log(d_{[km]}) + 20\log(f_{[MHz]}) \quad (3.17)$$

3.3.2 COST 231-walfish-ikegame

O COST 231 propôs a combinação dos modelos de Walfisch e Ikegami, baseado em diferentes contribuições dos membros do "COST 231 Subgroup on Propagation Models". Este modelo permite a estimação das perdas de propagação por consideração de mais dados que caracterizam um ambiente urbano, nomeadamente [Kurn99]:

- Altura do telhado dos edifícios h_{Roof},
- Largura das ruas w,
- Distância de separação entre os edifícios b e
- Orientação na rua no que diz respeito ao raio directo φ

Este modelo distingue entre situação de "*line-of-sight*" (LOS) de "*non-line-of-sight*" (NLOS). No caso de LOS, entre a estacão base e a antena do móvel, dentro da rua, a fórmula simples de propagação, diferente da do espaço livre pode ser aplicada.

$$L_{p[dB]} = 42.6 + 26\log(d_{[km]}) + 20\log(f_{[MHz]}), \quad d \geq 20m \quad (3.18)$$

Nos casos de NLOS, as perdas básicas de transmissão por três termos: perdas no espaço livre L_0, perdas por difracção múltipla L_{tt}, e difracção causada pelos telhados para a rua L_{tm}:

$$L_{p[dB]} = \begin{cases} L_{0[dB]} + L_{tt[dB]} + L_{tm[dB]}, & L_{tt} + L_{tm} > 0 \\ L_{0[dB]} & , L_{tt} + L_{tm} \end{cases} \quad (3.19)$$

onde

$$L_{tm[dB]} = -16.9 - 10\log(w_{s[m]}) + 10\log(f_{[MHz]}) + 20\log(H_{B[m]} - h_{m[m]}) + L_{ori[dB]} \quad (3.25)$$

com

$$L_{ori[dB]} = \begin{cases} -10.0 + 0.354\phi_{[0]} & ,0^0 \leq \phi \leq 35^0 \\ 2.5 + 0.075(\phi_{[0]} - 35) & ,35^0 \leq \phi \leq 55^0 \\ 4.0 - 0.114(\phi_{[0]} - 55) & ,55^0 \leq \phi \leq 90^0 \end{cases} \quad (3.20)$$

e onde

$$L_{tt[dB]} = L_{bsh[dB]} + k_a + k_d\log(d_{[km]}) + k_f\log(f_{[MHz]}) - 9\log(w_{B[m]}) \quad (3.21)$$

com

$$K_d = \begin{cases} 18 & ,h_b > H_B \\ 18 - 15\dfrac{h_b - H_B}{H_B} & ,h_b \le H_B \end{cases} \quad (3.28)$$

$$L_{bsh[dB]} = \begin{cases} -18\log(h_{b[m]} - H_{B[m]} + 1) & ,h_b > H_B \\ 0 & ,h_b \le H_B \end{cases} \quad (3.22)$$

$$K_a = \begin{cases} 54 & ,h_b > H_B \\ 54 - 0.8(h_{b[m]} - H_{B[m]}) & ,d \ge 0.5\ km \\ 54 - 1.6(h_{b[m]} - H_{B[m]} & ,d < 0.5\ km \end{cases} \quad \text{onde } h_b \le H_B \quad (3.23)$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0.7\left(\dfrac{f_{[MHz]}}{925} - 1\right) & ,\text{zonas urb. e suburb} \\ -4 + 1.5\left(\dfrac{f_{[MHz]}}{925} - 1\right) & ,\text{centros urbanos} \end{cases} \quad (3.24)$$

3.3.3 Modelo de Okumura-Hata

Este modelo empírico, que serve actualmente de padrão, foi proposto por Okumura em 1968, baseado em medidas na banda [150, 2000] MHz [Corr09]. O valor padrão do modelo, corresponde a um ambiente urbano sobre terreno quase plano, são depois adicionados factores de correcção.

O modelo fornece o valor mediano da atenuação de propagação, dependente de:

- *f* frequência
- *d* distância do móvel a base
- h_m altura da antena do móvel ao solo

O cálculo de L_p requer o conhecimento bastante detalhado do ambiente. Para cálculos gerais, o ambiente é usualmente classificado dentro de uma categoria. Comummente, é utilizado para ambientes rurais e suburbanos. Os ambientes são divididos em 3 classes [Corr09]:

- Área aberta: ausência de obstáculos numa região de pelo menos 300 a 400 m diante do móvel.
- Área suburbana: existência de alguns obstáculos, não muito densos, na região próxima do móvel

- Área Urbana: região com grande densidade urbanística, edifícios com 2 ou mais andares

A mediana da atenuação da propagação vem dada por:

$$\begin{aligned} L_{p[dB]} &= 69.55 + 26.16\log(f_{[MHz]}) - 13.82\log(h_{be[m]}) + \\ &+ [44.90 - 6.55\log(h_{be[m]})\log d_{[km]} - H_{mu[dB]}(h_m, f) \\ &- \sum \text{factores de correccao} \end{aligned} \tag{3.25}$$

onde

$$H_{mu[dB]} = \begin{cases} [1.10\log(f_{[MHz]}) - 0.70]h_{m[m]} - [1.56\log(f_{[MHz]}) - 0.80] & \text{Cidade pequena/media} \\ 8.29\log^2(1.54h_{m[m]}) - 1.10, & f \le 200MHz \text{ Cidade pequena} \\ 3.20\log^2(11.75h_{m[m]}) - 4.97, & f \ge 400MHz \text{ Cidade grande} \end{cases} \tag{3.26}$$

Para efeitos deste trabalho, temos os factores de correcção para áreas abertas, K_{oa}, ou quase abertas, K_{qo}

$$K_{oa}(f)_{[dB]} = 4.78\log^2(f_{[MHz]}) - 18.33\log(f_{[MHz]}) + 40.9 \tag{3.34}$$

$$K_{qo}(f)_{[dB]} = K_{oa}(f)_{[dB]} - 5 \tag{3.27}$$

O desvio padrão para ambientes urbano, σ_u, e suburbano, σ_s, é aproximado por:

$$\sigma_u(f)_{[dB]} = 0.70\log^2(f_{[MHz]}) - 2.50\log(f_{[MHz]}) + 11.10 \tag{3.28}$$

$$\sigma_s(f)_{[dB]} = 0.98\log^2(f_{[MHz]}) - 3.40\log(f_{[MHz]}) + 11.88 \tag{3.29}$$

Esta formulação é valida para:

- $f \in [150, 1500]\ MHz$
- $d \in [1, 20]\ km$
- $h_{be} \in [30, 200]\ m$
- $h_m \in [1, 10]$ m

3.4 Equipamentos

A implementação de qualquer rede TETRA, exige a instalação dos seguintes equipamentos:

- Centro de gestão de rede
- *Base Transceiver Radio* (BTS)

- Equipamentos de ligação (*Routers* e *hubs*)
- Equipamentos terminais

A Figura 3.3, mostra a configuração geral de uma rede TETRA.

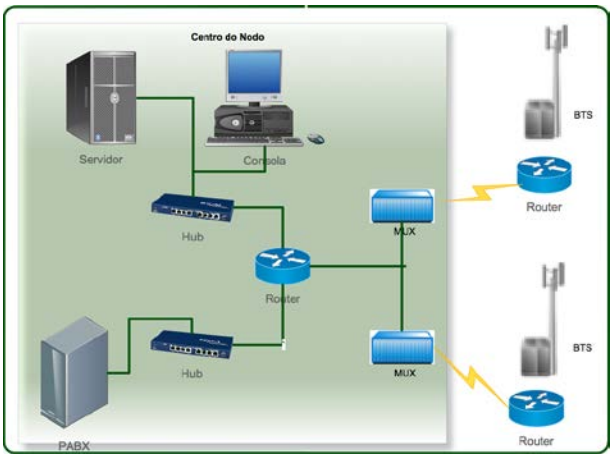


Figura 3.3: Estrutura geral da rede TETRA

3.4.1 Antenas

As antenas são o último componente da cadeia de transmissão. No entanto, a performance da rede não é dependente somente da antena, mas da interacção entre a antena e o ambiente rádio [Kurn99]. Esta situação faz com que a avaliação da performance da rede, na componente sistema de antenas seja feita de forma estocástica.

As funções básicas da antena são as seguintes:

- Ligação
- Supressão do ruído através do ganho e efectividade
- Supressão dos desvanecimento temporal e interferência através da diversidade da antena
- Supressão da interferência selectiva especial, através da directividade adaptativa da antena.

A escolha da antena, é determinante para um sistema de telecomunicações, em especial as suas características. Normalmente, para que o projecto seja funcional, a antena deve transmitir a potência de forma eficiente e com o mínimo de perdas (isso obriga a adaptar a impedância da antena com a linha de transmissão). Em sistemas móveis, utiliza-se tanto as antenas omnidireccionais como as antenas directivas.

A flutuação da potência do sinal, o desvanecimento causado pela multi-propagação tomado pela onda, e os objectos ao longo do percurso, fazem com que haja a margem desenhada no *linkg budget* que pode vir a dar alta consistência na qualidade e performance.

Esta margem pode ser menor em caso de uso da diversidade. A diversidade depende do

principio de reparação da informação redundante. Os domínios do canal de rádio do qual se pode usar a diversidade são:

- Espaço
- Características da antena
- Ângulo de orientação da antena
- Polarização
- Tempo/frequência (tipo de atraso ou diversidade de frequência)

A Tabela 3.1, mostra alguns modelos de antenas TETRA para bases do fabricante alemão, KATHREIN.

	Xpol Panel 12	**Dual Panel Polarization**	**Xpol Panel 65 15 dBi**	**Xpol 65 14.5 dBi**
Frequência [MHz]	380-430 430-50	380-430 430-5	380-430 430-50	380-430 430-4
Polarização	+45 -45	+45 -45	+45 -45	+45 -45
Ganho [dBi]	11,5 12	13,5 12 12,5 26	14.5	2 X 14.5 2 X 14
Front-to-back-ratio, copola	>25	>25	>25	>25 >24
Isolamento [dB]	>30	>30	>30	>30 >30
Impedância [Ω]	50	50	50	50 50
VSWR	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5 <1.5
Potência máxima de entrada [W]	500	400	500	500 500

Tabela 3.1: Antenas direccionais para estações base

	VPol Pane 120° 9 dBi	**LogPer 67° 10.5 dBi**	**VPlo Corner 44° 11 dBi**	**RCHPOL Helix 33° 12 dBi**
Frequência[MHz]	400 - 470	406 - 512	360 – 490	406 - 470
Polarização	Vertical	Vertical/Horiz	Vertical	Circular Direito
Ganho[dBi]	9	10.5	11	12
Half power beam width	H-Plane 120° E-Plane 50°	H-Plane 67° E-Plane 53°	H-Plane 44° E-Plane 67°	33°
Side-lobe suppression		>25 440 >20 406		
Impedância [Ω]	50	50	50	50
VSWR	<1.5	<1.5	<1.5	<1.2
Potência máxima de entrada [W]	500	300	180	560

Tabela 3.2: Antenas direccionais para estações base (cont.)

A tabela a seguir mostra ainda modelos de antenas omnidireccionais para estações base.

	742 - 155	**VPol Omnid. 5 dBi**	**K75 15 221**	**720 880**
Frequência [MHz]	450 - 470	380 - 406	440 - 470	440 - 470
Polarização	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical
Ganho [dBi]	8,5	5	5	7
Impedância [Ω]	50	50	50	50
VSWR	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5
Potência máxima de entrada [W]	100	500	55	500

Tabela 3.3: Antenas omnidireccionais para estações base

A antena para móvel, deverá cobrir toda a gama de critérios por razões práticas. Deve ser menor, leve, não obstrutiva e barata. Isto significa que, em geral, a antena usada para o móvel, devera ser a óptima de forma de vista de engenharia.

Antenas para locomotivas, são desenhadas para resistir a possíveis contactos com linhas de tensão. O maquinista não pode estar exposto a nenhum perigo via cabo de alimentação da antena. A Tabela 3.4, mostra alguns modelos a considerar no projecto.

	731495	K702021	87010009	87010006
Frequên	457.4 - 468	410 - 470	440 - 470	440 - 470
Polariza			Vertical	Vertical
Ganho	2 dBi	0 dBi	5 dBi	7 dBi
Impedân	50 Ω	50 Ω	50 Ω	50 Ω
VSWR	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5
Potência	10 W	170 W	55 W	500 W

Tabela 3.4: Antenas para locomotivas

3.4.2 Transceptores

Os equipamentos a instalar devem operar nas bandas de frequência exigidas nos requisitos, disponibilizando serviços de voz e tráfego de dados até a distância de cobertura de cada estação de base. O equipamento de ser capaz de operar continuamente 24/7 horas, e de preferência de construção modular. A tabela 3.5, mostra as opções disponíveis.

	ROHILL R-8060 TetraNode	TETRA-G TBS 11	Motorola MTS2 400
Potência [W]	25 50 Pico	10, 25 e 40	25 Sem Tx C 10 Com Tx C
Frequência [MHz]	350 – 470	380 – 400 410 – 430 450 – 470	350 – 470
Sensibilidade [dBm]	- 115 (estático)		-120 (estático)
	- 106 (dinâmico)		-113.5 (dinâmico)
Diversidade		1 ou 3 canais	3 canais
Largura Banda	25 kHz		5 MHz
Interface Linha	V.11, 64 ou128 kbps	V.11 a 64 kbps, E1	X.21, E1
Interface Ether.	10/100 Base-T RJ45		
Portadoras	1 Port. 4 slot TDMA	1 Port. 4 slot TDMA	2 Port. 8 slot TDMA
Dados	36 kbps		
Energia	24 VDC 8A máximo	220 VAC ou 48 VDC	220 VAC ou 48 VDC
Dimensões	Rack 19”/6U	Rack 19” 6U/9U	Rack de 19”

Tabela 3.5: Estações base

Os móveis devem ser adequados para um ambiente agressivo, cumprindo todas as especificações dos requisitos. A tabela 3.6, mostra algumas marcas de móveis a considerar.

	Motorola MTM 800	Sepura SRG3500
Especificação TETRA	EN 300 392 V+D Air Interface	EN 300 392 V+D Air Interface
Potência	3 W (classe 3)	10 W (Classe 2)
Frequência	380-390 MHz; 380-430 MHz	350 – 372 MHz; 380 – 430 MHz
	410-470 MHz; 806-870 MHz	407 – 473 MHz; 440 – 473 MHz
Sensibilidade	- 115 dBm (estático)	-112 dBm (estático)
	- 111 dBm (dinâmico)	-103 dBm (dinâmico)
GPS	12 Satélites (- 182 dBW)	12 Satélites (-163 dBW)
Ambiente de utilização	Poeira/Agua – EC529 IP54	Poeira/Agua – IEC529 IP54
	Vibração: ETS 300-019 1-7	Vibração: ETS 300 019-2-5
	Temperatura: -30°C a +60°C	Temperatura: -30°C a +70°C
Serviço de voz	Full Duplex/Half Duplex	Full Duplex/Half Duplex
Serviço de dados	SDS em TMO e DMO	SDS em TMO e DMO
Segurança/Encriptação	PIN/PUK, TEA1, TEA2, TEA3	PIN/PUK, TEA1, TEA2, TEA3
Interface de dados	RS232, USB e GCAI	ETSI/PEI port
DTMF	Sim	Sim
Energia	10.8 a 15.6 VDC	Típico: 13.8 VDC

Tabela 3.6: Estações Móveis

A tabela a 3.7 a seguir, mostra as características do equipamento portatel, a ser adoptado como modelo para o sistema.

	Motorola MTH 800	Sepura STP8000
Especificação TETRA	TETRA V+D	TETRA V+D
Potência	1 W	1.8 W (Classe 3L)
Frequência	380 – 430 MHz	300 – 344 MHz
	450 – 470 MHz	344 – 400 MHz
		380 – 430 MHz
		407 – 473 MHz
Sensibilidade	-116 dBm (estática)	-112 dBm (estático)
	-105 dBm (dinâmica)	-103 dBm (dinâmico)
GPS	12 Satélites/Antena integrada	GPS Based/Opção sGPS
Ambiente	IP54; ETS 300 019-1-7	IP 54; ETS 300 019-1-7

Tabela 3.8: Estações portáteis

3.5 Tráfego

3.5.1 Modelo de estimação

A análise de tráfego tem como objectivo o planeamento da afectação de recursos (número de canais), grau de serviço (GoS) e capacidade do sistema.

O TETRA é um sistema de partilha de recursos, o que significa que um número maior de utilizadores poderá partilhar de forma relativa um pequeno número de canais em cada célula, provendo dessa forma a toda a demanda de utilizadores, o acesso aos recursos do sistema [Misj07].

Quando os canais de tráfego estiverem ocupados, o próximo canal requisitado é bloqueado. As chamadas podem ser rejeitadas ou atrasadas. O standard TETRA especifica que em caso de bloqueio da interface aérea, os futuros pedidos são inseridos na fila de espera que é atendida logo que os canais estiverem livres, avaliando a prioridade de cada pedido [Misj07].

A estimação do tráfego oferecido é normalmente feita para a "hora de ponta", que pode ser tomada como [Corr09]:

- hora de ponta na célula com tráfego maior;
- hora de ponta no sistema
- média sobre todas as horas do sistema

A escolha de um critério para a "hora de ponta" tem implicações:

- na qualidade de serviço prestado;
- no número de estações base na rede.

De forma a determinarmos o tráfego oferecido em cada célula, teremos em conta os seguintes pressupostos:

- número total de utilizadores activos
- distribuição dos utilizadores na área de interesse.
- média do perfil do tráfego por utilizador.

Para uma determinada área de serviço, o tráfego oferecido e dado por:

$$T_{[Erl]} = N_{pop} p_{pen} p_{ut} T_{ut[Erl]} \tag{3.30}$$

onde

- N_{pop}: população da área
- p_{pen}: taxa de penetração

- p_{ut}: taxa de utilização
- T_{ut}: tráfego médio por utilizador

3.5.2 Grau de serviço

A qualidade de serviço é um dos objectivos a ser atingido, para o tráfego na hora mais carregada. O grau de serviço é definido como a probabilidade de a chamada esperar um determinado tempo. A expressão para GoS é definida como o número de canais de tráfego (N) e o tráfego oferecido em Erlang.

De forma a estimar o número de canais por célula, deverão ser especificados os seguintes objectivos:

- Grau de serviço
- Modelo de tráfego

O modelo de tráfego vai especificar a probabilidade de distribuição das chamadas no domínio do tempo. A distribuição a utilizar para sistemas de fila de espera é a de Erlang C, que é dada pela probabilidade de uma chamada ser atrasada P_{del}, para um tráfego oferecido T, dada por [Corr09]:

$$P_{del}(T,N_{TCH}) = \frac{T^{T_{TCH}} / N_{TCH}!}{T^{N_{TCH}} / N_{TCH}! + (1-T/N_{TCH}) \sum_{n=0}^{N_{TCH}-1} T^n / n!} \tag{3.31}$$

podendo o $P_{del,}$ ser expresso em termos de P_b

$$P_{del}(T,N_{TCH}) = \frac{1}{1+(1-T/N_{TCH})[(1/P_b(T,N_{TCH}))-1]} \tag{3.32}$$

O número médio de chamadas em espera é dado por:

$$\overline{N_{call\ del}} = P_{del}(T,N_{TCH}) \frac{T/N_{TCH}}{1-T/N_{TCH}} \tag{3.33}$$

Para dimensionamento de um sistema de fila de espera, a métrica desejada é o número de canais requeridos para prover a probabilidade de que uma chamada não excede a probabilidade do tempo de espera, onde o tempo de espera é dado por [Corr09]:

$$\overline{\tau_{del}} = \frac{P_{del}(T,N_{TCH})}{N_{TCH}} \frac{\bar{\tau}}{1-T/N_{TCH}} \tag{3.34}$$

Os parâmetros típicos do TETRA são dados na Tabela 3.9.

Tipo de chamada	Requisitos da rede	Tráfego por utilizador [Erl]
Chamada individual de voz	Dentro-*Site*	0,010
Chamada de voz do "*despacher*"	Entre-*Site*-Divisão	0,020
Chamada de voz "*intra site*"	Dentro-*Site*	0,030
Chamada de voz de uma divisão	Entre-*Site*-Divisão	0,010
Chamada de voz regional	Entre-*Site*-Regional	0,001

Tabela 3.9 Parâmetros de tráfego típicos em redes TETRA.

Dentro do *site* significa que a chamada foi originada dentro da área de serviço de uma estacão base, e entre-*site* que foi necessário o uso da infra-estrutura de interligação.

3.5.3 Capacidade requerida por célula

Um canal bidireccional transporta dados ou voz do utilizador. Geralmente está divido em quatro grupos, dependendo se está em modo de circuitos ou dados (no modo de dados, os utilizadores usam o canal de controlo comum). Os canais de tráfego são [DuGi99]:

- Canal de tráfego de voz (TCH/S)
- Canal de tráfego de dados a 7,2 kbps (TCH/7,2)
- Canal de tráfego de dados a 4,8 kbps (TCH/4,8)
- Canal de tráfego de dados a 2,4 kbps (TCH/2,4)

É possível, agrupar todos os canais de tráfego, para aumentar a capacidade. Capacidades acima de 28,8 kbps ou 14 kbps podem ser atingidos pela combinação de 4, 3 e 2 slots.

Para uma determinada largura de banda, a capacidade requerida pode ser determinado pelo factor de reutilização R. Para um determinado conjunto de células na rede, menor que o factor de reutilização, podemos obter a capacidade de portadoras através de:

$$B = C \times 25\ \text{kHz} \times R \tag{3.35}$$

onde:

- C – Capacidade da portadora
- B – Largura de banda

A Figura 3.3 mostra em resumo o processo a seguir na modelação de número de canais para atender a demanda do sistema.

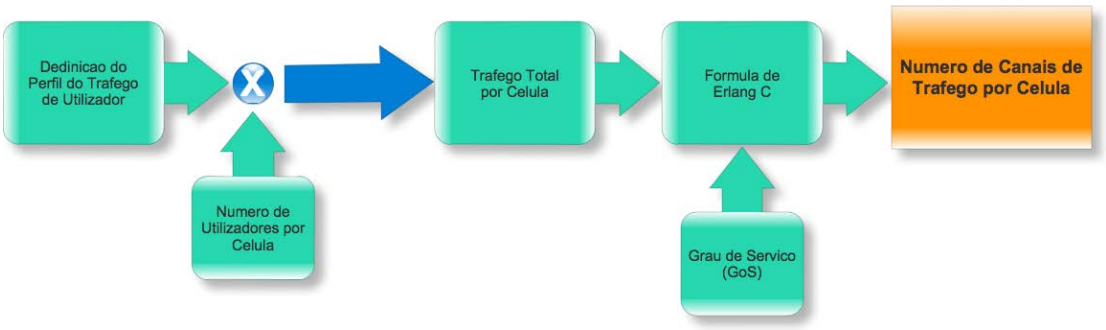


Figura 3.4: Processo para estimação de canais de tráfego.

3.6 Plano de frequências

O TETRA foi desenhado para funcionar nas frequências de 150 MHz a 900 MHz, e como é um sistema FDD, possui diferentes bandas de transmissão para os sentidos ascendente e descendente [DuGi99]. O TETRA suporta várias portadoras, múltiplas de 25 kHz.

De acordo com a cláusula 21.4.4.1 do EN 300 392-2 (ETSI 300 392-2 “Terrestrial Trunked Rádio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 2: Air Interface”), a frequência da portadora, devera ser definida como [ETSI10]:

- Frequência da portadora de “downlink” = frequência base + (portadora base x 25 kHz) + offset kHz;

e o número da portadora deve ser definido como (começa pelo valor “1”):

- Frequência da portadora de “downlink” = frequência base + (número da portadora x 25 kHz) + offset kHz

Para propósitos de definição da frequência da portadora, a frequência base, deverá ser igual a frequência de referência para a banda. O número de portadora é a portadora número (N).

A frequência de offset da portadora, pode ter os seguintes valores:

a) -6,25 kHz;
b) 0 kHz;
c) +6,25 kHz; e
d) +25,5 kHz.

De acordo com os requisitos do sistema, temos os seguintes grupos de frequências (ficha da UIC ORI 751-3):

- MS Tx: 457,400 a 458,450 MHz e
- BS Tx: 467,400 a 468,450 MHz (A band) ou
- BS Tx: 447,400 a 448,450 MHz (B band).

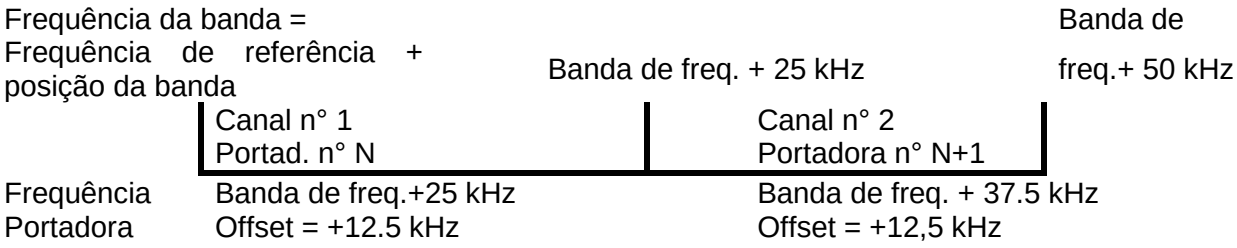


Figura 3.5: Canais de rádio e numeração de canais em 440 a 470 MHz (Extraído em[ETSI04])

A estratégia de atribuição de canais pode ser implementada de várias formas, baseando-se na área de cobertura e nas células adjacentes em que o CIR_{min} é mantido com alta probabilidade. Outra forma de implementar, é a atribuição de forma centralizada ou distribuída, da seguinte forma:

- No esquema centralizado, os canais são atribuídos por uma central de controlo.
- No esquema distribuído, o canal é seleccionado entre todos os canais disponíveis pela estação base, da célula onde a chamada é inicializada ou seleccionada de forma autónoma pelo móvel, e cada estação, deve ter informação sobre os canais disponíveis noutras estações.

Nesta rede, julgamos funcional o esquema de atribuição fixa de canais, baseado nas condições de reuso do canal.

Como se depreende, os grupos de frequências da ficha 751-3 da UIC e as bandas reservadas pelo TETRA, coincidem para a banda A. A Tabela 3.10, indica os canais disponíveis para uso.

O tamanho mínimo do *cluster* é dado por:

$$K = \sqrt{\frac{2}{3}.SIR} \tag{3.36}$$

Podendo-se concluir que o *cluster* mínimo em TETRA é de 7, providenciando 24 canais de voz por célula por MHz. De acordo com figura 3.5, na banda dos 450 MHz, podemos obter as seguintes frequências:

Canal	Transmissão ascendente (MHz)	Transmissão descendente (MHz)
1	457.400	467.400
2	457.425	467.425
3	457.450	467.450
4	457.475	467.475
5	457.500	467.500
6	457.525	467.525
7	457.550	467.550
8	457.575	467.575
9	457.600	467.500
10	457.625	467.625
11	457.650	467.650
12	457.675	467.675
13	457.700	467.700
14	457.725	467.725
15	457.750	467.750
16	457.775	467.775
17	457.800	467.800
18	457.825	467.825
19	457.850	467.850
20	457.875	467.875
21	457.900	467.900
22	457.925	467.925
23	457.950	467.950
24	475.975	467.975
25	458.000	468.000
26	458.025	468.025
27	458.050	468.050
28	458.075	468.075
29	458.100	468.100
30	458.125	468.125
31	458.150	468.150
32	458.175	468.175
33	458.200	468.200
34	458.225	468.225
35	458.250	468.250
36	458.275	468.275
37	458.300	468.300
38	458.325	468.325
39	458.350	468.350
40	458.375	468.375
41	458.400	468.400
42	458.425	468.425
43	458.450	468.450

Tabela 3.10: Canais disponíveis para uso.

3.7 Interferência

Os sistemas de comunicação, em especial os sistemas de comunicação móveis, têm o seu desempenho afectado em grande medida pelas interferências. As principais interferências são: outro móvel na mesma célula, uma chamada em andamento numa célula vizinha, outras estações base operando em faixa de frequência, ou em algum sistema não celular que cause interferência ao sistema celular. Dessa forma, o desempenho do sistema pode ser afectado, através de erros causados na sinalização digital, o que pode gerar bloqueio e perda de chamadas. Os dois principais tipos de interferência celular são a interferência co-canal e a interferência de canal adjacente.

3.7.1 Interferência co-canal

Este tipo de interferência ocorre em células que utilizam o mesmo conjunto de frequência e com o reuso de frequência, dependendo da distância entre as células co-canais vizinhas, pode ocorrer interferência. Uma maneira de evitar esse problema é o uso de distância mínima, de forma a garantir um isolamento adequado entre elas [Corr09].

Para distâncias entre as estações base maiores que o raio de cobertura da BS, assume-se que o desvanecimento é completamente não correlacionado. Pode ser dado pelo caso mais pessimista, em que o factor de reuso é:

$$\text{Factor de reuso} = \frac{r_1 + r_2}{r_2} = 1 + 10\left(C/I_c + \sqrt{2\sigma^2}Q^{-1}(p)\right)/10^n \tag{3.37}$$

onde:

p – probabilidade de que sofra interferência;

Q-1(p) – inverso da função Q(α), definida em termos de função complementar de erro como:

$$Q(\alpha) = \frac{1}{2}\text{erfc}\left(\frac{\alpha}{\sqrt{2}}\right) \tag{3.38}$$

Na Tabela 5.25, temos os valores mais comuns, usados em para planificação celular em TETRA, quando n=4 e C/Ic=19 dB.

Variabilidade do local (α)	Probabilidade de sofrer interferências (p)	
	5%	10%
6 dB	7,7	6,6
8 dB	9,7	7,9
10 dB	12,4	9,5

Tabela 3.11: Factor de reuso

3.7.2 Interferência canal adjacente

A interferência canal adjacente, ocorre em sinais que estão na faixa de frequência adjacente à faixa do sinal desejado. Por motivo de imperfeição do filtro do receptor, frequências em faixas muito próximas da faixa desejada são captados [Garg07]. Esse problema recebe o nome de efeito perto-longe, onde um transmissor próximo (podendo inclusive não fazer parte do sistema) causa forte interferência de canal adjacente em outro receptor. Geralmente, esse problema surge se um usuário em canal adjacente estiver transmitindo muito próximo ao receptor de um outro usuário, enquanto o receptor deste último tenta receber sinal de uma estação base no canal desejado. De outra maneira, o efeito perto-longe também ocorre quando o móvel próximo da estação base transmite num canal próximo do canal que está sendo usado por um outro móvel, cujo sinal está fraco (podendo ser um móvel que esteja mais distante da estação base em questão). Neste caso, a estação base pode ter dificuldades em discriminar o usuário cujo o sinal está mais fraco [Garg07].

Uma alternativa para minimizar o problema da interferência de canal adjacente, é através da filtragem adequada e uma correcta alocação de canais entre células. Em cada célula é alocado apenas uma parte dos canais disponíveis, dessa forma, deve-se evitar a alocação, para uma mesma célula, de canais que são adjacentes em frequência. A alocação de canais na célula deve ser o mais afastado possível em frequência. Assim, a interferência de canal adjacente pode ser consideravelmente reduzida. De acordo com o tamanho do *cluster*, é possível criar vários esquemas de alocação de canal entre células de forma a maximizar a separação entre canais em uma mesma célula. Uma outra fonte de interferência de canal adjacente que também se deve prevenir é o uso de canais adjacentes de células vizinhas.

Capítulo 4

Dimensionamento

Neste capítulo procede-se aos cálculos relativos a área de cobertura, das estações base ao longo das linhas ferroviárias. A análise é sempre feita para a situação mais desfavorável, isto é, na situação em que o móvel ou portátil e se encontram dentro da cabine da locomotiva. A previsão é realizada para 90% e 95%.

4.1 Características do sistema

A rede da descrita neste documento pretende constituir uma infra-estrutura de rede móvel que, tal como solicitado nas especificações técnicas, suporte todas as necessidades de comunicações do CFM, nomeadamente no que se refere a comunicações para suporte ao sistema de controlo de tráfego.

O dimensionamento de uma rede de telecomunicações, em especial uma rede TETRA para aplicações ferroviárias, tem como objectivos principais a determinação das características básicas de transmissão e transporte para o serviço que se deseja servir, nos aspectos seguintes:

- topologia;
- largura de banda;
- capacidade de auto-recuperação.

O desenho da presente rede, obedece aos seguintes critérios fundamentais:

- capacidade de transmissão requerida;
- número de interfaces necessários, e
- energia.

4.2 Escolha de equipamentos

A rede do CFM Sul apresenta um padrão de tráfego focalizado no transporte de mercadorias, sendo o tráfego de passageiros ocasional. Esta característica resulta da necessidade dos países vizinhos que pretendem ter acesso ao Porto de Maputo e Matola, fazerem-no através das linhas do CFM Sul que percorem longas distâncias no interior do pais em direcção aos países do "*interland*", atravessando zonas remotas e de acesso difícil e em algumas delas, sem o mínimo de infra-estruturas, como estradas e rede eléctrica.

Por isso, a escolha de equipamentos vai baseia-se em equipamentos de fácil manutenção, pouco consumo de energia, que permita a utilização de fontes alternativas (solar ou eólica) e de gestão remota.

4.2.1 TBS (TETRA Base stations)

É importante para os CFM, adquirirem equipamentos de fácil instalação e manutenção, a custos reduzidos.

Os equipamentos MTS2 400, da Motorola e TETRA G BTS11 da TeamSimoco (antiga

PHILIPIS), são equipamentos de alta gama, de fabricantes reputados, contudo baseados em componentes proprietários, que mantem o cliente fortemente ligado ao fornecedor.

O equipamento ROHILL R-8060 TetraNode, baseado no padrão compactPCI, usa componentes de hardware e software padronizados, o que faz dele uma plataforma completamente aberta. Estes equipamentos, possuem uma base de dados distribuída que garante um poder elevado de recuperação do sistema. É uma plataforma baseada em software (Linux), que garante a gama mais completa de funções de radiocomunicações digitais. Outra característica importante deste equipamento, é consumo de potências baixas de energia e capacidade de operar com eficiência em uma gama ampla de temperaturas e uma excelente protecção contra o pó e vibração.

A nossa escolha vai para o equipamento ROHILL R-8060 TetraNode, pelas razões acima expostas.

4.2.2 Estações móveis e portáteis

Para estes equipamentos, uma das características importantes que nos interessa aferir, é a qualidade de áudio do equipamento, a par de outras características como a protecção contra o pó, vibração e impermeabilidade.

Dos modelos propostos, a nossa escolha recai para os equipamentos Motorola MTM800 e MTH800, pois representam o “mais alto estado de arte” na concepção de terminais TETRA, aliado ao facto de a Motorola se encontrar representada localmente, o que pode facilitar a aquisição de acessórios e componentes para os equipamentos em causa.

4.3 Ambiente e características de utilização

A instalação de qualquer rede exige a determinação inequívoca dos serviços a serem prestados e dos locais a servir. A Tabela 4.1, indica os locais que deverão ser cobertos pela nova rede, as características geográficas (localização e elevação, Figuras 4.1 a 4.3).

Linha	Locais com Instalações	Coordenadas Sul	Coordenadas Este	Elev. AMSL	Altura da Torre	PMR Rádio	PMR Rept	Comunicações de Dados - IP OBC	ATW	ERP	VoIP	RMC	Energia Terras	Hrs. req.
Ressano Garcia	Matola Gare	25º49'44.41"	32º27'03.91"	40		Sim		Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	6
	Pessene	25º41'41.37"	32º20'47.41"	97		Sim		Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	6
	Moamba	25º36'15.51"	32º14'28.25"	113		Sim		Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	6
	RG Montanha	25º27'56.60"	31º59'51.39"	258	35	Sim		Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	6
	RG Torre de Controlo	25º26'24.36"	31º59'29.76"	124		Sim		Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	6
	RG Estação	25º26'23.99"	31º59'26.12"	124	35	Sim		Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	6
Goba e (Ramal Salamanga)	Boane	26º02'30.08"	32º19'45.50"	31	50	Sim		Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	6
	Fabrica de Travessas	26º03'22.36"	32º21'39.37"	11		Sim		Não	Não	Sim	Não	Sim	Sim	6
	Goba Montanha	26º12'39.99"	32º08'19.76"	250		Não		Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	6
	Goba Estação	26º11'56.19"	32º08'38.08"	83		Sim		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	6
	Salamanga Torre	26º26'31.76"	32º38'.54.98"	16	50	Sim		Não	Não	Sim	(Sim)	Sim	Sim	10
	Salamanga Estação	26º26'25.38"	32º38'58.57"	17		Não		Sim	Sim	Não	Não	N	n/a	n/a

	OCC	25º57'30.52"	32º33'07.38"	6		Sim		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	15-30 min
	Cabine B	25º57'14.92"	32º32'54.16"	6		Sim		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	4
	Cabine D	25º56'52.43"	32º32'21.61"	8		Sim		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	4
	CFM Prédio	25º57'57.79"	32º34'24.84"	41		Não		Não	Não	Sim	Não	Sim	Sim	2
	Gare de Mercadorias	25º55'31.99"	32º35'32.64"	52		Sim		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	6
	Machava	25º54'45.75"	32º29'15.76"	30		Sim		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	6
	Cais de Mineiro	25º57'04.84"	32º29'58.65"	11		Sim		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	6
	Terminal de Combustíveis Escritórios	25º57'55.92"	32º30'04.27"	8		Não		Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	6
Maputo Metro	Terminal de Combustíveis	25º57'40.97"	32º30'05.83"	5		Não		Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	6

	Marracuene												Sim	10
	Manhiça Torre	25º24'15.78"	32º48'14.53"	35	50	Não		Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	10
	Manhiça Estação	25º24'09.11"	32º48'18.01"	34		Sim		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	10
	Xinavane	25º02'39.89"	32º47'19.80"	24		Sim		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	12
	Magude	25º01'41.52"	32º38'50.76"			Sim		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	6
	Chokwe	24º31'46.14"	32º59'40.50"		50	Sim		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	6
	Mabalane	23º50'56.28"	32º37'34.50"		75	Sim		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	6
	Combumune	23º22'49.56"	32º33'35.70"		75	Sim		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	6
	Mpuzi	22º04'47.73"	31º14'56.82"		50	Sim	`	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	6
	Mapai	22º43'45.36"	32º03'26.88"		50	Sim		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	6
Limpopo	Chicualacuala	22º04'47.73"	31º40'58.43"		75	Sim		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	6

Tabela 4.1: Ambiente de utilização e exigências ao sistema

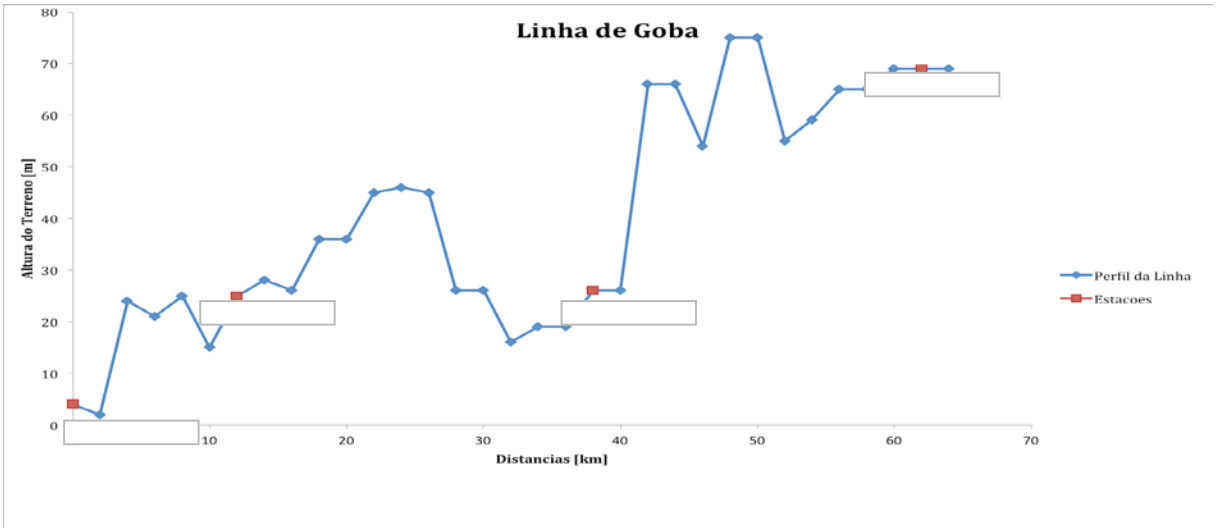


Figura 4.1: Linha de Goba

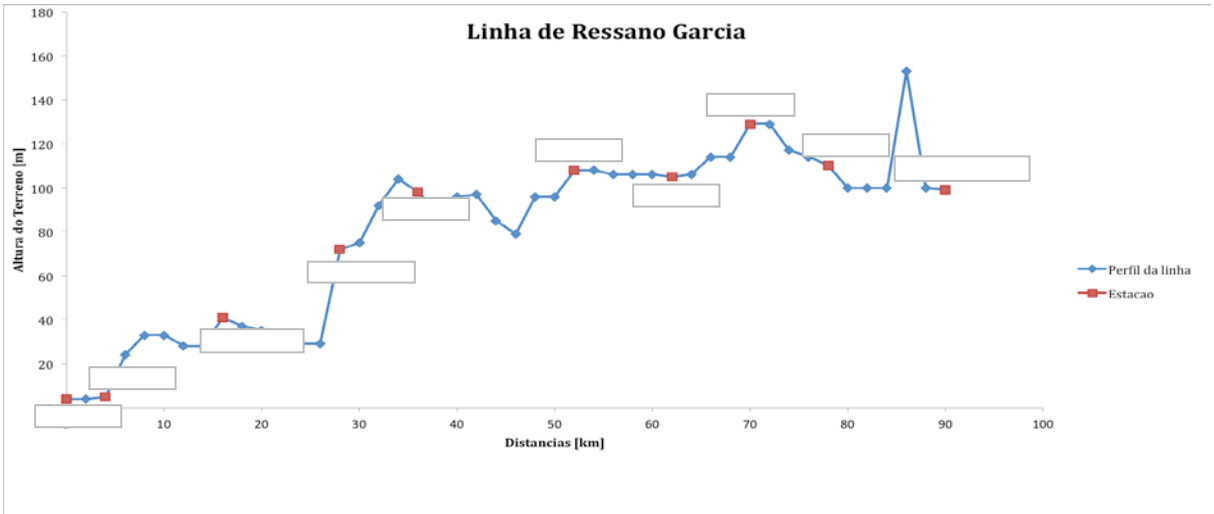


Figura 4.2: Linha de Ressano Garcia

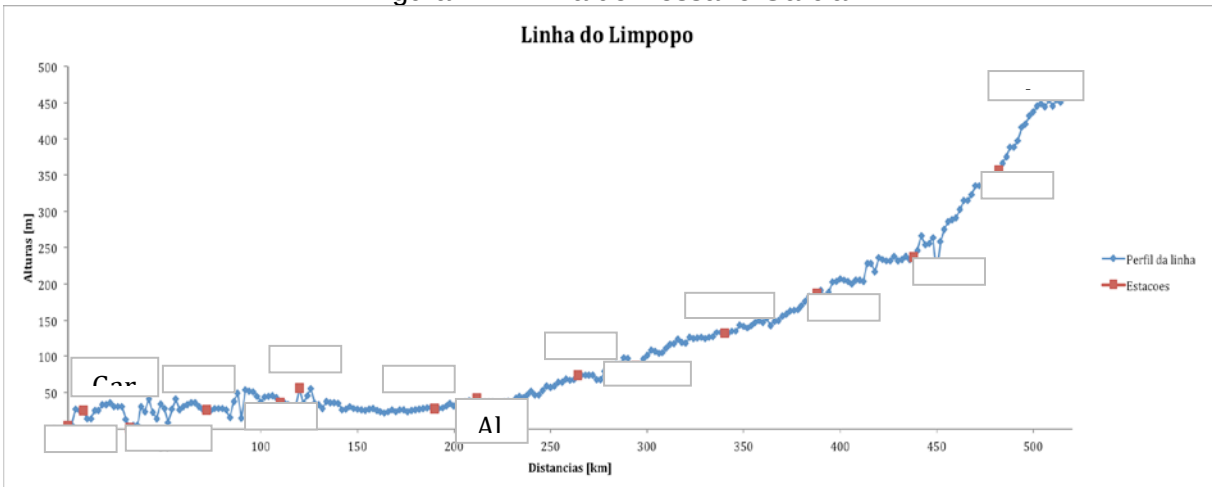


Figura 4.3: Linha do Limpopo

O CFM Sul possui uma infra-estrutura de torres para telecomunicações, que se encontram sem utilização na maior parte dos casos. A linha do Limpopo, em especial, foi outrora beneficiada com uma infra-estrutura de torres e abrigos "*shelters*" para equipamentos de telecomunicações, que ainda se encontram em bom estado de conservação. Essa infra-estrutura encontra-se implantada em estações e ao longo da linha, como ilustra a Figura 4.4.

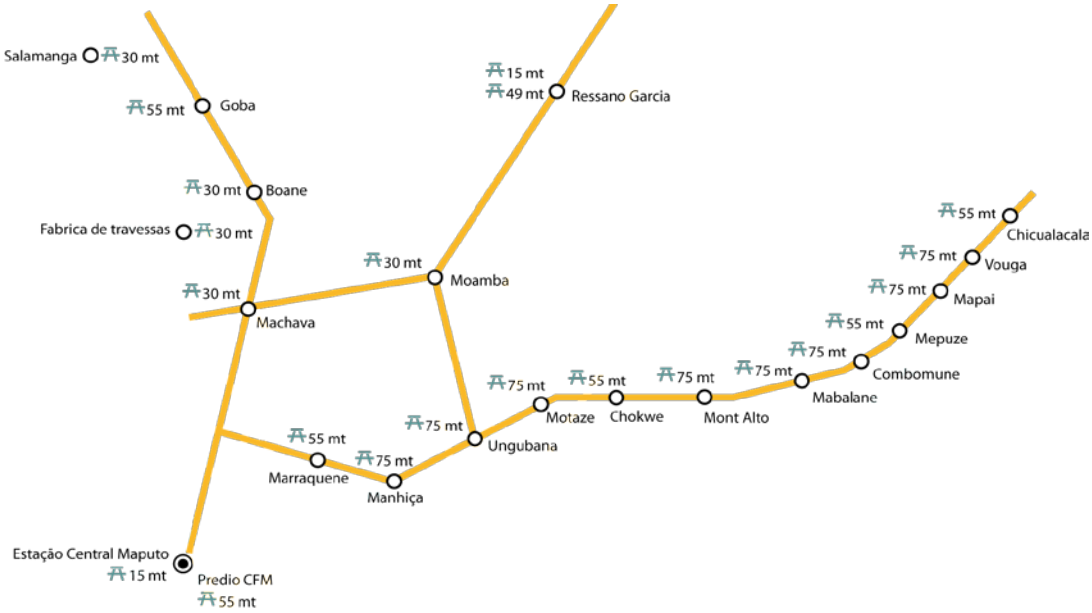


Figura 4.4: Infra-estrutura (torres) de telecomunicações na rede do CFM Sul

4.4 Análise unicelular

A análise unicelular será realizada de acordo com as condições do ambiente de propagação e dos requisitos do sistema baseados em ORI 751-3 na banda [440, 470] MHz.

4.4.1 Características dos equipamentos a utilizar

Os parâmetros a usar no dimensionamento para os equipamentos do utilizador encontram-se na Tabela 4.2.

Características	Estacão Base Rohill R-8060 TetraNode	Estacão Móvel Motorola MTM800	Portátil Motorola MTH800
$P_{Tx[dBm]}$	44	35	30
$P_{Rx[min]}$	-112	-103	-105
$G_{Tx/Rx[dBi]}$	Omnidireccional: 7	2	0
	Direccional: 9		
$L_{c[dB]}$	6	2	0
$G_{Tx/Rx[dBi]}$(locomotiva)	5		

Tabela 4.2:Caracteristicas dos equipamentos a instalar.

4.4.2 Disponibilidade do sistema

De acordo com (3.1) a atenuação do sistema para a situação mais desfavorável é de 156 dB. Contudo há necessidade de contabilizar as margens para os casos seguintes $M_{F\,SF}$ (desvanecimento lento), $M_{F\,FF}$ (desvanecimento rápido), e L_{int} (penetração em interiores). A análise é realizada para 90% e 95% de probabilidade de cobertura de espaço e tempo.

De acordo com (3.9), o desvio padrão para o ambiente rural será $\sigma(470)_{dB} = 9.79dB$.

De acordo com (3.10), a margem desvanecimento lento para 90% e 95%, é de 17.74 dB e 22.79 dB, respectivamente. O desvanecimento rápido foi contabilizado com base em (3.16), sendo o valor para 90% de 3.62 dB e 95% de 4.76 dB. As margens totais devido ao desvanecimento, são no total de 21.02 dB para 90% e 27.55 dB para 95%.

A equação (3.5) permite-nos concluir que o L_{total} é de 134.98 dB a 90% de previsão de cobertura, e 128.45 dB para 95%.

4.4.3 Cálculo da altura efectiva

A altura efectiva da antena é dependente do nível médio do terreno, entre os 3 a 15 km, medidos a partir da base da torre que irá suportar a antena. A altura efectiva vai variar de acordo com o perfil do terreno; a Figura 4.5 mostra as componentes para cálculo.

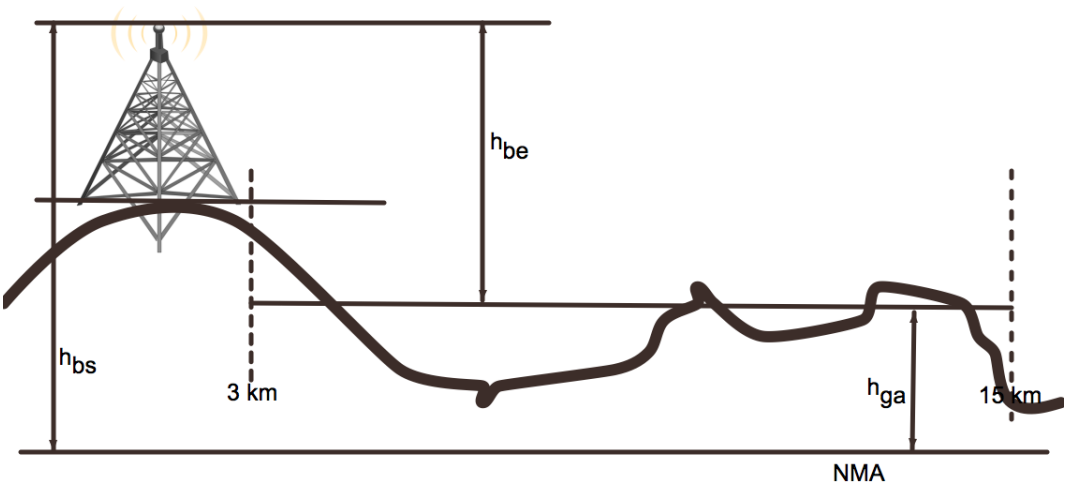


Figura 4.5: Componentes de cálculo da h_{be}

O h_{be} será dado por:

$$h_{be} = h_{bs} - h_{ga} \quad (4.1)$$

Para a primeira estação base teremos de acordo com (4.1), os valores da Tabela 4.2.

	$H_{ef[m]}$ na direcção de propagação					
	Goba		Ressano Garcia		Limpopo	
	h_{be} Torre	h_{be} Predio	h_{be} Torre	h_{be} Predio	h_{be} Torre	h_{be} Prédio
$A_{t[m]} = 55$	47	98	49	100	44	**95**
$C_{t[m]} = 4$						
$C_{p[m]} = 41$(prédio)						
$A_{p[m]} = 66$ (prédio)						

Tabela 4.3: Determinação da altura efectiva da 1ª estação base.

Analisando a instalação na torre junto à estacão central e a opção de instalação no topo do prédio da 24 de Julho, a instalação no prédio mostra-se mais favorável.

4.4.4 Raio de cobertura

O Modelo de propagação de Okumura-Hata satisfaz todas as condições do sistema. A Tabela 4.3 indica os parâmetros para o modelo de propagação adoptado.

	Caso Pessoa/Via/Veículos	Caso Locomotiva
Tipo de ambiente	Rural	Rural
Frequência	470 MHz	470 MHz
Altura da antena de TBS	95 m	95 m
Altura da antena de MS	1,5 m	3,7 m

Tabela 4.4: Parâmetros para o modelo de Okumura-Hata.

Na rede em estudo, identificam-se dois cenários de propagação: quando a comunicação é feita por um simples utilizador (portátil de mão), altura de 1,5 m, e quando a comunicação é feita a partir de uma locomotiva (com portátil ou estação móvel) a 3,7 m. Para efeitos de estudo do sistema, assumimos o caso mais desfavorável, ou seja a 1,5 m.

No cenário em estudo, o modelo de Okumura Hata fornece uma cobertura de 31,62 km de raio para 90% e 21.37 km de raio para 95%.

O sistema em análise é *duplex*, havendo por isso, transmissão e recepção tanto do lado da TBS (como do móvel. De acordo com (3.2) e (3.3), há a necessidade de calcular o EIRP para cada sentido de ligação, como forma de balancear a potência e minimizar a diferença de alcance entre o *uplink* e o *downlink*.

No sentido descendente, o L_p máximo é de 158 dB para cobertura do raio 25.11 km a 95% e 38.02 km a 90%. No sentido ascendente o L_p máximo é de 156 dB para cobertura do raio 25.11 km a 95% e 33.11 km a 90%.

4.5 Cobertura da primeira estação base

A determinação do número de estações bases, numa primeira fase, irá basear-se nos valores da primeira estacão base calculada (instalação baseada no prédio do CFM), tomando o critério seguinte:

$$\mathbf{d_{max} = \min\left\{d_{max}(ascendente), d_{max}(descendente)\right\}} \quad (4.2)$$

De acordo com (4.2), o raio por célula, para cobertura de 95%, será $d_{max[km]} = \min\left\{25.11, 21.30\right\}$ ou seja $d_{max[km]} = 21.30$.

A Figura 4.7 mostra a área de cobertura da primeira estação base, que cobre essencialmente a área metropolitana de Maputo.

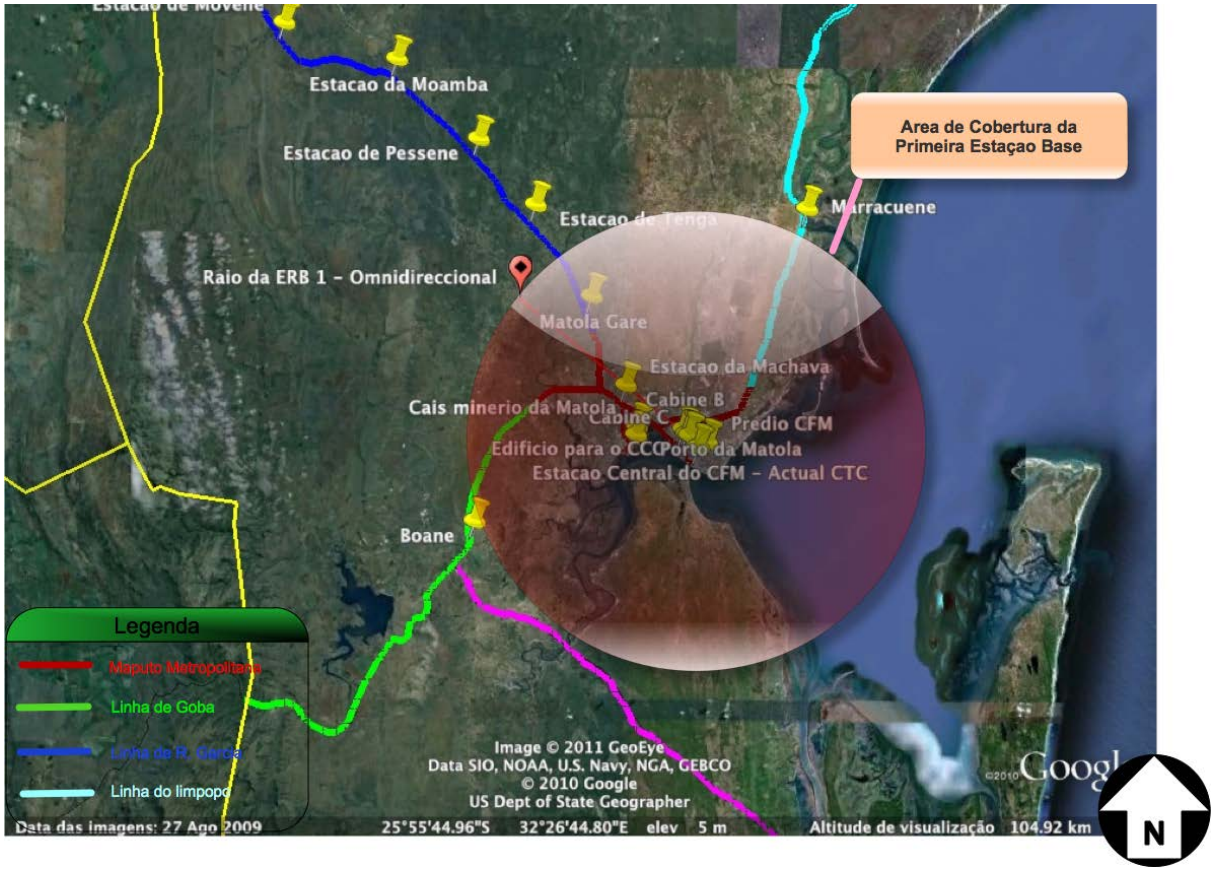


Figura 4.6: Cobertura da primeira TBS

Capítulo 5

Análise de desempenho

Neste capitulo, analisamos a capacidade da tecnologia em realizar a cobertura da rede ferroviária em estudo, a dimensão da infra-estrutura a implantar, e a capacidade de prover as comunicações necessárias, entre o centro regulador e os comboios e a comunicação entre estes.

5.1 Linha de Goba

Estação n° 01

As radiocomunicações são sempre influenciadas pelo terreno do ponto de vista de reflexões, atenuação e difracção. A Tabela 5.1 mostra as características da estação a implantar em termos de topografia do terreno e características dos equipamentos.

Dados da estação			
Nome	Boane	**Linha de transmissão**	
Posição	26° 2' 30.08S/32° 19' 45.50"E	Tipo	
Elevação	31m	Comprimento (m)	
Altura da torre	50 m	Atenuação (dB)	6dB
Altura efectiva	8 m		
Equipamentos		**Antena**	
Marca	ROHILL	Marca	KATHREIN
Modelo	R8060 TETRANODE	Modelo	XPOL 800 10403
Potência	44 dBm	Ganho (dBi)	14.5

Tabela 5.1: Características da estação base (Boane)

As perdas de atenuação são $L_{P[dB]} = 100.93 + 38.98 \log d_{(km)}$, resultando nos sentidos descendente e ascendente $L_{p\ max}$= 163.5 dB, logo L_p = 135.95 dB para 95%, e L_{max}= 142.13 dB para 90%, e no sentido ascendente

O raio de cobertura com antenas direccionais na estação base, encontra-se na Tabela 5.2.

	Raio da BS [km]	Raio do MS [km]
Área rural (95%)	8	8
Área rural (90%)	11.22	11.22

Tabela 5.2 Raio de cobertura da BS e MS com antenas direccionais.

Estação n° 02

A Tabela 5.3 mostra as características da estação a implantar em termos de topografia do terreno e características dos equipamentos.

Dados da estação			
Nome	Goba Monte	**Linha de transmissão**	
Posição	26° 12’ 39.99S/32° 8’ 19.75”E	Tipo	
Elevação	252m	Comprimento (m)	
Altura da torre	15 m	Atenuação (dB)	6dB
Altura efectiva	196 m		
Equipamentos		**Antena**	
Marca	ROHILL	Marca	KATHREIN
Modelo	R8060 TETRANODE	Modelo	XPOL 800 10403
Potência	44 dBm	Ganho (dBi)	14.5

Tabela 5.3: Características da estação base (Goba Monte)

Perdas no espaço

$$L_{P[dB]} = 81.73 + 29.88 \log d_{(km)}$$

No sentido descendente (downlink) e ascendente (uplink), são validos os valores de $L_{p\ max}$ e L_p obtidos na estação anterior.

O Raio de cobertura, baseado em 95% e de 90% de probabilidade de exceder a sensibilidade de referência para além da área de cobertura (Operação móvel). Com antenas direccionais.

	Raio da BS [km]	Raio do MS [km]
Área rural (95%)	64.56	64.56
Área rural (90%)	100	100

Tabela 5.4: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% e 90%(Antenas direccionais)

A cobertura desta linha pode ser realizada apenas com a instalação de uma estação base no monte que se encontra a 800 m da estação de Goba, cobrindo a área que vai da estação de Goba à zona metropolitana de Maputo. Há no entanto que referir que se teria que verificar ainda o horizonte-rádio para as distâncias da ordem de muitas dezenas de quilómetros.

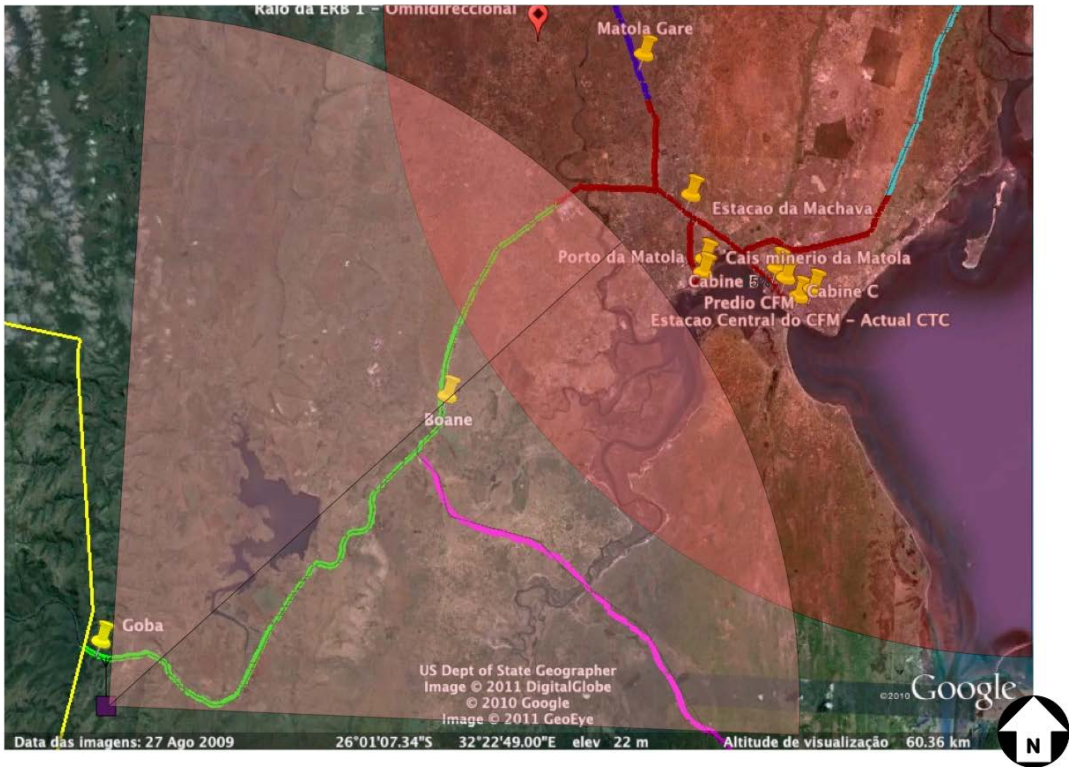


Figura 5.1: Cobertura da linha de Goba

5.2 Linha de Ressano Garcia

Estação n° 01

A Tabela 5.7 a seguir, mostra as características da estação a implantar em termos de topografia do terreno e características dos equipamentos.

Dados da estação			
Nome	Movene	**Linha de transmissão**	
Posição	25° 36’ 15.51S/32° 14’ 28.25”E	Tipo	
Elevação	113m	Comprimento (m)	
Altura da torre	30 m	Atenuação (dB)	6dB
Altura efectiva	$132m_{Maputo}/146m_{Ressano\ Garcia}$		
Equipamentos		**Antena**	
Marca	ROHILL	Marca	KATHREIN
Modelo	R8060 TETRANODE	Modelo	XPOL 800 10403
Potência	44 dBm	Ganho (dBi)	14.5

Tabela 5.5: Características da estação base (Moamba)

Perdas no espaço

$$L_{P[dB]} = 84.09 + 31.01 \log d_{(km)}$$

$$L_{P[dB]} = 83.49 + 30.72 \log d_{(km)}$$

Raio de cobertura, baseado em 95% de probabilidade de exceder a sensibilidade de referência para além da área de cobertura (Operação móvel). Com antenas direccionais.

	Raio da BS [km]	Raio do MS [km]
Área rural (95%)	$45.70_{Maputo}/50.11_{R.Garcia}$	$45.70_{Maputo}/50.11_{R.Garcia}$
Área rural (90%)	$74.13_{Maputo}/89.12_{R.Garcia}$	$74.13_{Maputo}/89.12_{R.Garcia}$

Tabela 5.6: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)

A figura 5.2, mostra a cobertura da linha de Ressano Garcia.

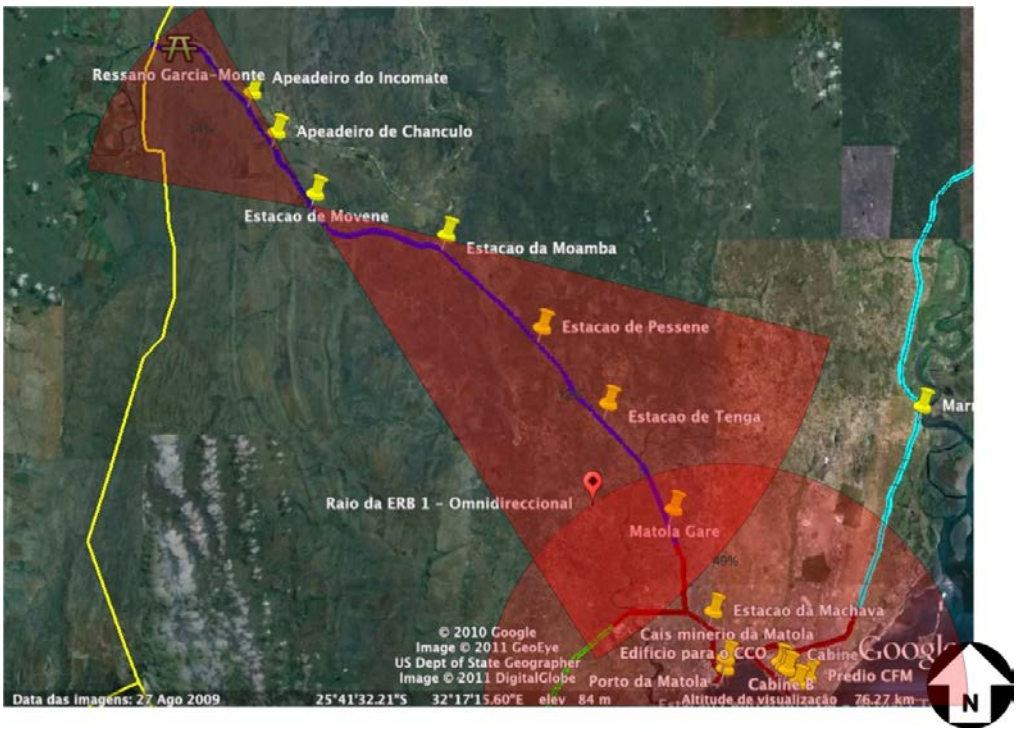


Figura 5.2: Cobertura da linha de Ressano Garcia

5.3 Linha do Limpopo

Estação n° 01

A Tabela 5.10 a seguir, mostra as características da estação a implantar em termos de

topografia do terreno e características dos equipamentos.

Dados da estação			
Nome	Marracuene	**Linha de transmissão**	
Posição	25° 44’ 41.31S/32° 40’ 36.71”E	Tipo	
Elevação	17m	Comprimento (m)	
Altura da torre	50 m	Atenuação (dB)	6dB
Altura efectiva	$64m_{Maputo}/59m_{Manhica}$		
Equipamentos		**Antena**	
Marca	ROHILL	Marca	KATHREIN
Modelo	R8060 TETRANODE	Modelo	XPOL 800 10403
Potência	44 dBm	Ganho (dBi)	14.5

Tabela 5.7: Características da estação base (Marracuene)

Perdas no espaço

$$L_{P[dB]} = 88.37 + 33.06 \log d_{(km)}$$

$$L_{P[dB]} = 88.86 + 33.30 \log d_{(km)}$$

Raio de cobertura, baseado em 95% e 90% de probabilidade de exceder a sensibilidade de referência para além da área de cobertura (Operação móvel). Com antenas direccionais.

	Raio da BS [km]	Raio do MS [km]
Área rural (95%)	$25.70_{Maputo}/26.30_{Manhica}$	$25.70_{Maputo}/26.30_{Manhica}$
Área rural (90%)	$40.73_{Maputo}/39.81_{manhica}$	$40.73_{Maputo}/39.81_{Manhica}$

Tabela 5.8: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% e 90% (Antenas direccionais)

Estação n° 02

A Tabela 5.9 a seguir, mostra as características da estação a implantar em termos de topografia do terreno e características dos equipamentos.

Dados da estação			
Nome	Manhiça	**Linha de transmissão**	
Posição	25° 24’ 15.80S/32° 48’ 14.53”E	Tipo	
Elevação	35m	Comprimento (m)	
Altura da torre	75 m	Atenuação (dB)	6dB
Altura efectiva	$100m_{Marracuene}/94m_{Magude}$		
Equipamentos		**Antena**	
Marca	ROHILL	Marca	KATHREIN
Modelo	R8060 TETRANODE	Modelo	XPOL 800 10403
Potência	44 dBm	Ganho (dBi)	14.5

Tabela 5.9: Características da estação base (Manhiça)

Perdas no espaço

$$L_{P[dB]} = 85.74 + 31.8 \log d_{(km)}$$

$$L_{P[dB]} = 86.16 + 31.98 \log d_{(km)}$$

Raio de cobertura, baseado em 95% e 90% de probabilidade de exceder a sensibilidade de referência para além da área de cobertura (Operação móvel). Com antenas direccionais.

	Raio da BS [km]	Raio do MS [km]
Área rural (95%)	$36.30_{Marracuene}/35.48_{Magude}$	$36.30_{Marracuene}/35.48_{Magude}$
Área rural (90%)	$58.9_{Marracuene}/56.23_{Magude}$	$58.9_{Marracuene}/56.23_{Magude}$

Tabela 5.10: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% e 90% (Antenas direccionais)

A Figura 5.3, mostra a cobertura das primeiras duas estações na linha do Limpopo.

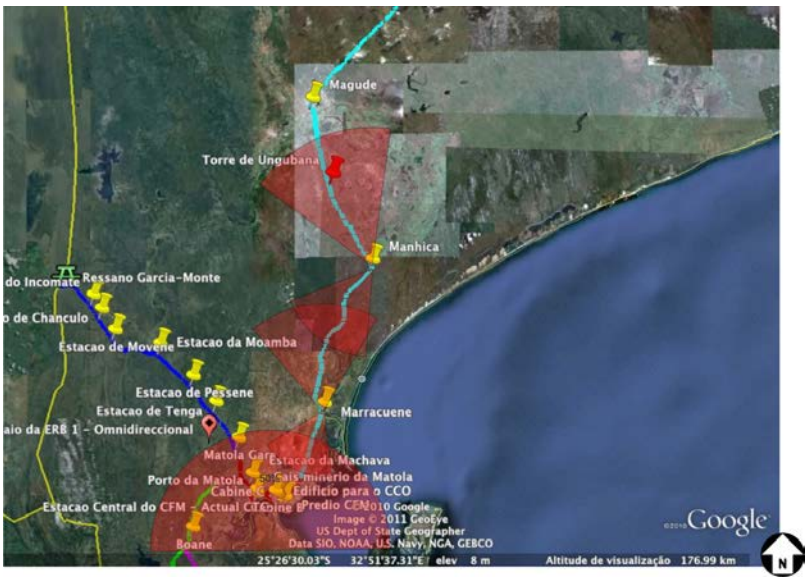


Figura 5.3: Cobertura das estações de Marracuene e Manhiça

Estação n° 03

A Tabela 5.11 a seguir, mostra as características da estação a implantar em termos de topografia do terreno e características dos equipamentos.

Dados da estação			
Nome	Ungubana	**Linha de transmissão**	
Posição	25° 12’ 11.25S/32° 41’ 47.91”E	Tipo	
Elevação	45m	Comprimento (m)	
Altura da torre	75 m	Atenuação (dB)	6dB
Altura efectiva	$90m_{Manhica}/112m_{Magude}$		
Equipamentos		**Antena**	
Marca	ROHILL	Marca	KATHREIN
Modelo	R8060 TETRANODE	Modelo	XPOL 800 10403
Potência	44 dBm	Ganho (dBi)	14.5

Tabela 5.11: Características da estação base (Ungubana)

Perdas no espaço

$$L_{P[dB]} = 86.33 + 32.1 \log d_{(km)}$$

$$L_{P[dB]} = 85.01 + 31.47 \log d_{(km)}$$

Raio de cobertura, baseado em 95% e 90% de probabilidade de exceder a sensibilidade de referência para alem da área de cobertura (Operação móvel). Com antenas direccionais.

	Raio da BS [km]	Raio do MS [km]
Área rural (95%)	$34.67_{Manhica}/41.69_{Magude}$	$34.67_{Manhica}/41.69_{Magude}$
Área rural (90%)	$54_{Manhica}/64.56_{Magude}$	$54_{Manhica}/64.56_{Magude}$

Tabela 5.12: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)

Estação n° 04

A Tabela 5.13 a seguir, mostra as características da estação a implantar em termos de topografia do terreno e características dos equipamentos.

Dados da estação			
Nome	Motaze	**Linha de transmissão**	
Posição	25° 46' 57.75S/32° 51' 46.80"E	Tipo	
Elevação	25m	Comprimento (m)	
Altura da torre	75 m	Atenuação (dB)	6dB
Altura efectiva	$95m_{Magude}/99m_{Chokwe}$		
Equipamentos		**Antena**	
Marca	ROHILL	Marca	KATHREIN
Modelo	R8060 TETRANODE	Modelo	XPOL 800 10403
Potência	44 dBm	Ganho (dBi)	14.5

Tabela 5.13: Características da estação base (Motaze)

Perdas no espaço

$$L_{P[dB]} = 86 + 31.94 \log d_{(km)}$$

$$L_{P[dB]} = 85.75 + 31.83 \log d_{(km)}$$

Raio de cobertura, baseado em 95% e 90% de probabilidade de exceder a sensibilidade de referência para além da área de cobertura (Operação móvel). Com antenas direccionais.

	Raio da BS [km]	Raio do MS [km]
Área rural (95%)	$36.30_{Magude}/38.01_{Chokwe}$	$36.30_{Magude}/38.01_{Chokwe}$
Área rural (90%)	$57.54_{Magude}/58.88_{Chokwe}$	$57.54_{Magude}/58.88_{Chokwe}$

Tabela 5.14: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)

A Figura 5.4. mostra a cobertura das estações de Ungubana e Motaze.

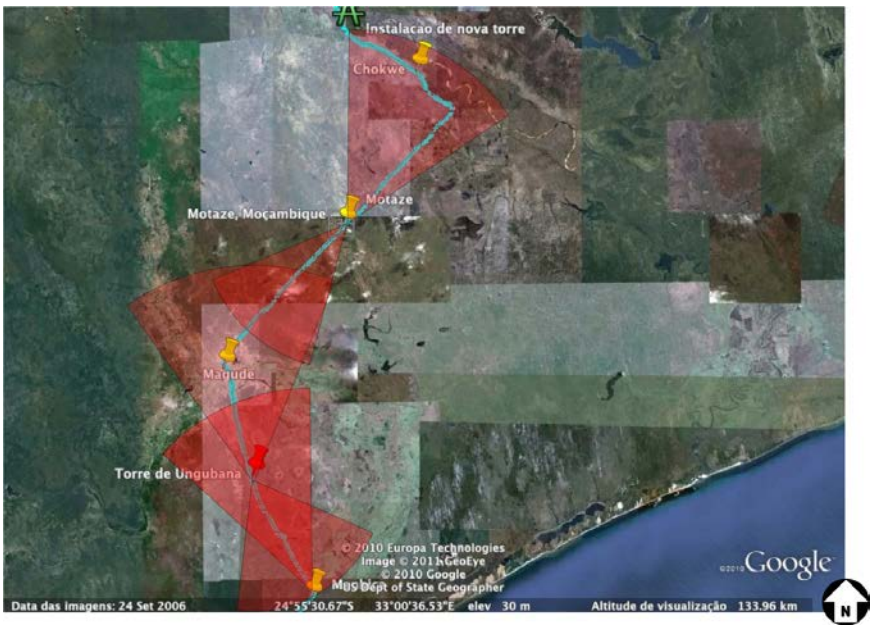


Figura 5.4: Cobertura das estações de Ungubana e Motaze

Estação n° 05

A Tabela 5.15 a seguir, mostra as características da estação a implantar em termos de topografia do terreno e características dos equipamentos.

Dados da estação			
Nome	Chokwe	**Linha de transmissão**	
Posição	24° 31' 56.77S/33° 00' 05.03"E	Tipo	
Elevação	35m	Comprimento (m)	
Altura da torre	55 m	Atenuação (dB)	6dB
Altura efectiva	$85m_{Motaze}/84m_{Mont'Alto}$		
Equipamentos		**Antena**	
Marca	ROHILL	Marca	KATHREIN
Modelo	R8060 TETRANODE	Modelo	XPOL 800 10403
Potência	44 dBm	Ganho (dBi)	14.5

Tabela 5.16: Características da estação base (Chokwe)

Perdas no espaço

$$L_{p[dB]} = 86.67 + 32.26\log d_{(km)}$$

$$L_{p[dB]} = 86.74 + 32.29\log d_{(km)}$$

Raio de cobertura, baseado em 95% de probabilidade de exceder a sensibilidade de referência para alem da área de cobertura (Operação móvel). Com antenas direccionais.

	Raio da BS [km]	Raio do MS [km]
Área rural (95%)	$33.88_{Motaze}/33.11_{Mont'Alto}$	$33.88_{Motaze}/33.11_{Mont'Alto}$
Área rural (90%)	$51.28_{Motaze}/51.28_{Mont'Alto}$	$51.28_{Motaze}/51.28_{Mont'Alto}$

Tabela 5.17: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)

Estação n° 06

A Tabela 5.18 a seguir, mostra as características da estação a implantar em termos de topografia do terreno e características dos equipamentos.

Dados da estação			
Nome	Mont'Alto	**Linha de transmissão**	
Posição	24° 23' 32.47S/32° 50' 28.40"E	Tipo	
Elevação	50m	Comprimento (m)	
Altura da torre	75 m	Atenuação (dB)	6dB
Altura efectiva	$117m_{Chokwe}/117m_{Mabalane}$		
Equipamentos		**Antena**	
Marca	ROHILL	Marca	KATHREIN
Modelo	R8060 TETRANODE	Modelo	XPOL 800 10403
Potência	44 dBm	Ganho (dBi)	14.5

Tabela 5.18: Características da estação base (Mont'Alto)

Perdas no espaço

$$L_{p[dB]} = 84.83 + 31.35\log d_{(km)}$$

A equação para as perdas no espaço livre é única para os dois sentidos. h_{be}=117m.

Raio de cobertura, baseado em 95% de probabilidade de exceder a sensibilidade de referência para alem da área de cobertura (Operação móvel). Com antenas direccionais.

	Raio da BS [km]	Raio do MS [km]
Área rural (95%)	$41.69_{Chokwe}/41.69_{Mabalane}$	$41.69_{Chokwe}/41.69_{Mabalane}$
Área rural (90%)	$67.60_{Chokwe}/67.60_{Mabalane}$	$67.60_{Chokwe}/67.60_{Mabalane}$

Tabela 5.19: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)

A Figura 5.5. mostra a cobertura das estações de Chokwe e Mont'Alto.

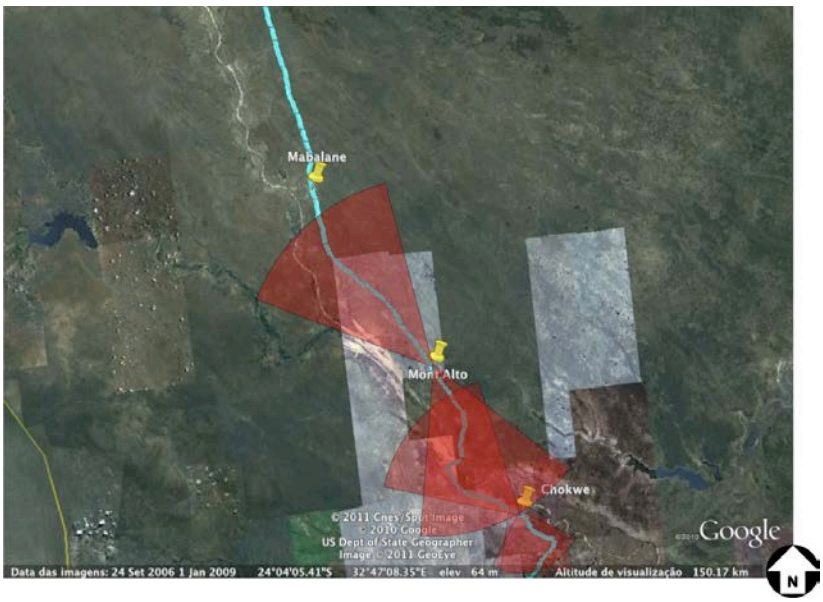


Figura 5.5: Cobertura das estações de Chokwe e Mont'Alto

Estação n° 07

A Tabela 5.19 a seguir, mostra as características da estação a implantar em termos de topografia do terreno e características dos equipamentos.

Dados da estação			
Nome	Mabalane	**Linha de transmissão**	
Posição	24° 23' 32.47S/32° 50' 28.40"E	Tipo	
Elevação	108m	Comprimento (m)	
Altura da torre	75 m	Atenuação (dB)	6dB
Altura efectiva	$117m_{Mont'alto}/117m_{Mabalane}$		
Equipamentos		**Antena**	
Marca	ROHILL	Marca	KATHREIN
Modelo	R8060 TETRANODE	Modelo	XPOL 800 10403
Potência	44 dBm	Ganho (dBi)	14.5

Tabela 5.20: Características da estação base(Mabalane)

Perdas no espaço

$$L_{p[dB]} = 82.47 + 30\log d_{(km)}$$

$$L_{p[dB]} = 82.40 + 30.24\log d_{(km)}$$

A equação para as perdas no espaço livre é única para os dois sentidos. h_{be}=117m.

Raio de cobertura, baseado em 95% de probabilidade de exceder a sensibilidade de referência para além da área de cobertura (Operação móvel). Com antenas direccionais.

	Raio da BS [km]	Raio do MS [km]
Área rural (95%)	$60.00_{Mont'Alto}/58.88_{Combumune}$	$60.00_{Mont'Alto}/58.88_{Combumune}$
Área rural (90%)	$95.4_{Mont'Alto}/89.13_{combumune}$	$95.4_{Mon'Alto}/89.13_{Combumune}$

Tabela 5.21: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)

Estação n° 08

A Tabela 5.22 a seguir, mostra as características da estação a implantar em termos de topografia do terreno e características dos equipamentos.

Dados da estação			
Nome	Combumune	**Linha de transmissão**	
Posição	23° 27' 49.74S/32° 33' 59.04"E	Tipo	
Elevação	126m	Comprimento (m)	
Altura da torre	75 m	Atenuação (dB)	6dB
Altura efectiva	$117m_{Mont'alto}/117m_{Mabalane}$		
Equipamentos		**Antena**	
Marca	ROHILL	Marca	KATHREIN
Modelo	R8060 TETRANODE	Modelo	XPOL 800 10403
Potência	44 dBm	Ganho (dBi)	14.5

Tabela 5.22: Características da estação base(Combumune)

Perdas no espaço

$$L_{p[dB]} = 81.65 + 29.88\log d_{(km)}$$

$$L_{p[dB]} = 81.78 + 29.9\log d_{(km)}$$

A equação para as perdas no espaço livre é única para os dois sentidos. h_{be}=117m.

Raio de cobertura, baseado em 95% e 90% de probabilidade de exceder a sensibilidade de referência para alem da área de cobertura (Operação móvel). Com antenas direccionais.

	Raio da BS [km]	Raio do MS [km]
Área rural (95%)	$64.56_{Mabalane}/64.56_{Mepuze}$	$64.56_{Mabalane}/64.56_{Mepuze}$
Área rural (90%)	$100.00_{Mabalane}/100.00_{Mepuze}$	$100.00_{Mabalane}/100.00_{Mepuze}$

Tabela 5.23: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)

A Figura 5.7, mostra a cobertura das estações de Mabalane e Combumune.

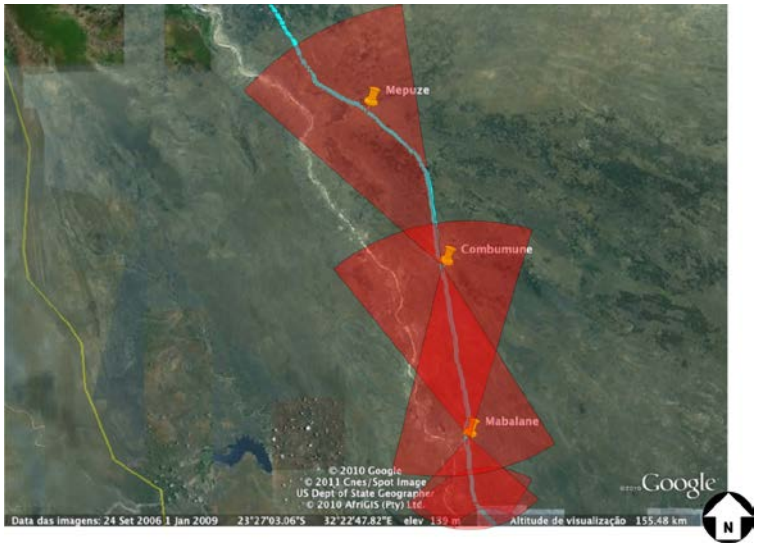


Figura 5.6: Cobertura das estações de Mabalane e Combumune

Estação n° 09

A Tabela 5.24 a seguir, mostra as características da estação a implantar em termos de topografia do terreno e características dos equipamentos.

Dados da estação			
Nome	Mepuze	**Linha de transmissão**	
Posição	23° 06' 08.80S/32° 23' 37.11"E	Tipo	
Elevação	165m	Comprimento (m)	
Altura da torre	50 m	Atenuação (dB)	6dB
Altura efectiva	$205m_{Combumune}/117m_{Mapai}$		
Equipamentos		**Antena**	
Marca	ROHILL	Marca	KATHREIN
Modelo	R8060 TETRANODE	Modelo	XPOL 800 10403
Potência	44 dBm	Ganho (dBi)	14.5

Tabela 5.24: Características da estação base(Combumune)

Perdas no espaço

$$L_{p[dB]} = 81.39 + 29.75 \log d_{(km)}$$

$$L_{p[dB]} = 81.65 + 29.89 \log d_{(km)}$$

A equação para as perdas no espaço livre é única para os dois sentidos. h_{be}=117m.

Raio de cobertura, baseado em 95% e 90% de probabilidade de exceder a sensibilidade de referência para alem da área de cobertura (Operação móvel). Com antenas direccionais.

	Raio da BS [km]	Raio do MS [km]
Área rural (95%)	$67.60_{Combumune}/66.00_{Mapai}$	$67.60_{Combumune}/66.00_{Mapai}$
Área rural (90%)	$100.00_{Combumune}/100.00_{Mapai}$	$100.00_{Combumune}/100.00_{Mapai}$

Tabela 5.25: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)

Estação n° 10

A Tabela 5.26 a seguir, mostra as características da estação a implantar em termos de topografia do terreno e características dos equipamentos.

Dados da estação			
Nome	Mapai	**Linha de transmissão**	
Posição	22° 50' 02.50S/32° 22' 42.72"E	Tipo	
Elevação	227m	Comprimento (m)	
Altura da torre	50 m	Atenuação (dB)	6dB
Altura efectiva	$266m_{Mepuzi}/260m_{Vouga}$		
Equipamentos		**Antena**	
Marca	ROHILL	Marca	KATHREIN
Modelo	R8060 TETRANODE	Modelo	XPOL 800 10403
Potência	44 dBm	Ganho (dBi)	14.5

Tabela 5.27: Características da estação base (Mapai)

Perdas no espaço

$$L_{p[dB]} = 79.82 + 29.00 \log d_{(km)}$$

$$L_{p[dB]} = 79.96 + 29.00 \log d_{(km)}$$

A equação para as perdas no espaço livre é única para os dois sentidos. h_{be}=117m.

Raio de cobertura, baseado em 95% e 90% de probabilidade de exceder a sensibilidade de referência para além da área de cobertura (Operação móvel). Com antenas direccionais.

	Raio da BS [km]	Raio do MS [km]
Área rural (95%)	$79.00_{Mapai}/79.00_{Vouga}$	$79.00_{Mapai}/79.00_{Vouga}$
Área rural (90%)	$141.00_{Mapai}/141.00_{Vouga}$	$141.00_{Mapai}/141.00_{Vouga}$

Tabela 5.28: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)

Estação n° 11

A Tabela 5.28 a seguir, mostra as características da estação a implantar em termos de topografia do terreno e características dos equipamentos.

Dados da estação			
Nome	Chicualacuala	**Linha de transmissão**	
Posição	22° 04’ 09.13S/31° 41’ 20.86”E	Tipo	
Elevação	423m	Comprimento (m)	
Altura da torre	75 m	Atenuação (dB)	6dB
Altura efectiva	475m$_{Mapai}$		
Equipamentos		**Antena**	
Marca	ROHILL	Marca	KATHREIN
Modelo	R8060 TETRANODE	Modelo	XPOL 800 10403
Potência	44 dBm	Ganho (dBi)	14.5

Tabela 5.29: Características da estação base(Mapai)

Perdas no espaço

$$L_{p[dB]} = 76.34 + 27.36 \log d_{(km)}$$

A equação para as perdas no espaço livre é única para os dois sentidos. h_{be}=117m.

Raio de cobertura, baseado em 95% e 90% de probabilidade de exceder a sensibilidade de referência para além da área de cobertura (Operação móvel). Com antenas direccionais.

	Raio da BS [km]	Raio do MS [km]
Área rural (95%)	138.00$_{Chicualacuala}$	138.00$_{Chuicualacuala}$

Tabela 5.30: Raio de cobertura da BS e MS a probabilidade de 95% (Antenas direccionais)

A figura 5.7 a seguir mostra a cobertura da TBS de Chicualacuala para Mapai.

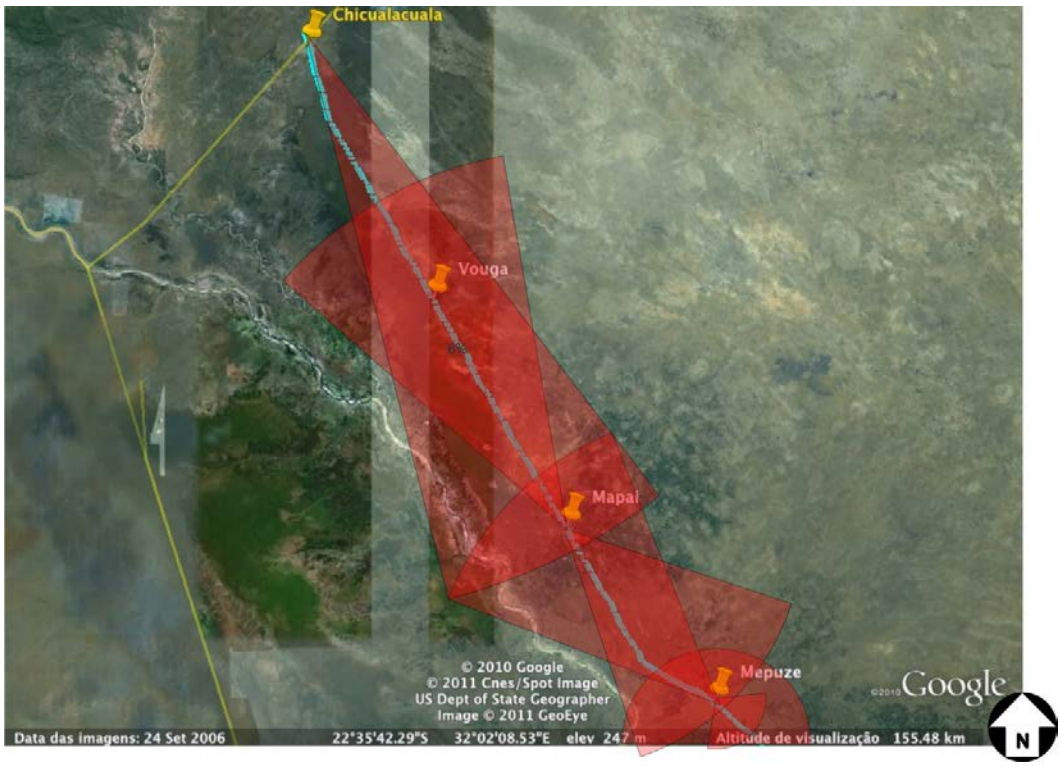


Figura 5.7: Cobertura das estações de Mapai e Chicualacuala

A Figura 5.9, mostra a localização de todas as estações, dentro da rede do CFM Sul.

Figura 5.8: Mapa resumo da localização das estações na rede do CFM Sul

5.4 Análise de desempenho

Esta avaliação incide sobre aspectos qualitativos e quantitativos da rede, e da fiabilidade do sistema. Entende-se como qualitativos os aspectos relacionados com o serviço a ser fornecido, e quantitativos os relacionados com os recursos necessários para prover os serviços desejados.

5.4.1 Aspectos qualitativos

Os aspectos qualitativos estão relacionados com a qualidade de transmissão, as medidas de atenuação global, atraso na propagação, largura de banda, comportamento do sistema com o ruído, e influência da interferência.

- **Atenuação global do sistema**: O cálculo de cobertura foi realizado tendo em conta o sinal mínimo necessário para se estabelecer as comunicações com o mínimo de "erros". Em comunicações móveis é importante analisar as atenuações relacionadas com o ruído AWGV (Additive White Gaussian Noise), o deslocamento de Doppler e a propagação em ambientes que causam múltiplos percursos. Foi objecto de analise e adicionados no cálculos das perdas de percurso as perdas por deslocamentos que causam múltiplos percursos, pois consideramos que as contribuições do efeito de Doppler e do ruído branco não irão alterar em medida significativa, os resultados do desempenho global do sistema.
- **Atraso na propagação**: Dado o facto de as comunicações serem totalmente terrestres, este aspecto poderá ser considerado quase nulo. Não oferece problemas ao nosso sistema.
- **Largura de banda**: Este aspecto foi amplamente analisado durante o estudo do TETRA, comparando os requisitos do sistema, tendo sido verificado que o débito oferecido pelos equipamentos cobre sem problemas as necessidades requeridas.
- **Comportamento do sistema com o ruído**: No processo de análise de *link budget*, foram adicionados factores suficientes para garantir os níveis máximos da taxa de BER (taxa de erros de bits). Um aspecto importante é que estes factores são dependentes da tecnologia utilizada, e o TETRA apresenta uma boa relação.
- **Influência das interferências**: O número de frequências disponíveis são suficientes para qualquer padrão de se deseje adoptar, podendo-se ir até ao limite de em cada célula se atribuir um grupo de frequências. Contudo esta opção não seria a mais praticável. Em termos de interferências, não nos parece que seja possível que num futuro próximo, com a disponibilidade de frequências existentes, venha a existir este problema.

5.4.2 Aspectos quantitativos

Define-se como aspectos quantitativos aqueles que estão relacionados com a avaliação do número de recursos (canais e equipamentos) para que o tráfego previsto seja suportado.

- **Número de canais (frequências):** Conforme descrito em 3.6 e 3.6.1, usa-se-à as frequências disponíveis, realizando a sua distribuição na base de uma das metodologias descritas, não sendo necessariamente que seja em forma de *cluster* ou planar, mas escolhendo as mais afastadas possíveis, dado o facto de que esta faixa de frequências não se encontra em utilização na zona em estudo. Contudo, pode-se decidir também, por uma atribuição linear, considerando-se que um grupo ainda mais pequeno de frequências (planeamento linear), podendo ser 4 ou 5, são suficientes para cobrir sem problemas a área em estudo.
- **Capacidade do sistema**: O sistema TETRA na versão em análise, o debito binário máximo no utilizador por ir até 28,8 kbit/s – correspondente a 4 TS (Time Slots) TDMA de 7,2 kbit/s. Contudo, uma chamada de voz, utiliza um canal correspondente a 1 TS, isto é o BW (Bandwidth), requerido para transporte de voz em tetra é de 7,2 kbit/s.

  A TBS, proposta para esta rede, requer 32 kbit/s para transmissão de 4 canais de voz. A interface V.11, permite 64 ou 128 kbit/s para links de interligação ao eXchange TetraNode. Estes links, também podem ser realizados a partir de interfaces G.703, ISDN ou E1.

  O CFM, possui 25 locomotivas com uma disponibilidade diária de 60%, o que significa que por dia tem disponíveis 15 locomotivas. Isto implica 15 móveis diários, cuja comunicação não é simultânea. Em relação à área de manobras, a situação actual é de cerca de 2 a 3 comboios simultâneos na área de Maputo (a mais movimentada) e possivelmente quando solicitado, um comboio em manobras em cada estação. Assim, tem-se 5 a 6 comunicações simultâneas na primeira célula (área metropolitana de Maputo), e uma comunicação em cada uma das outras estações. Deste modo, é necessário uma capacidade para atender a 8 comunicações simultâneas na área metropolitana de Maputo, e uma comunicação nas restantes estações. Isto significa duas portadores na área metropolitana de Maputo, e uma portadora em cada uma das estações.

Célula	Transmissão ascendente (MHz)	Transmissão descendente (MHz)
Para a zona metropolitana de Maputo		
1-1	457.400	467.400
	457.425	467.425

Para zonas fora de Maputo		
2	457.600	467.500
3	457.625	467.625
4	457.650	467.650

Tabela 5.31: Coordenação de frequências.

A Figura 5.10 mostra a repetição das frequências:

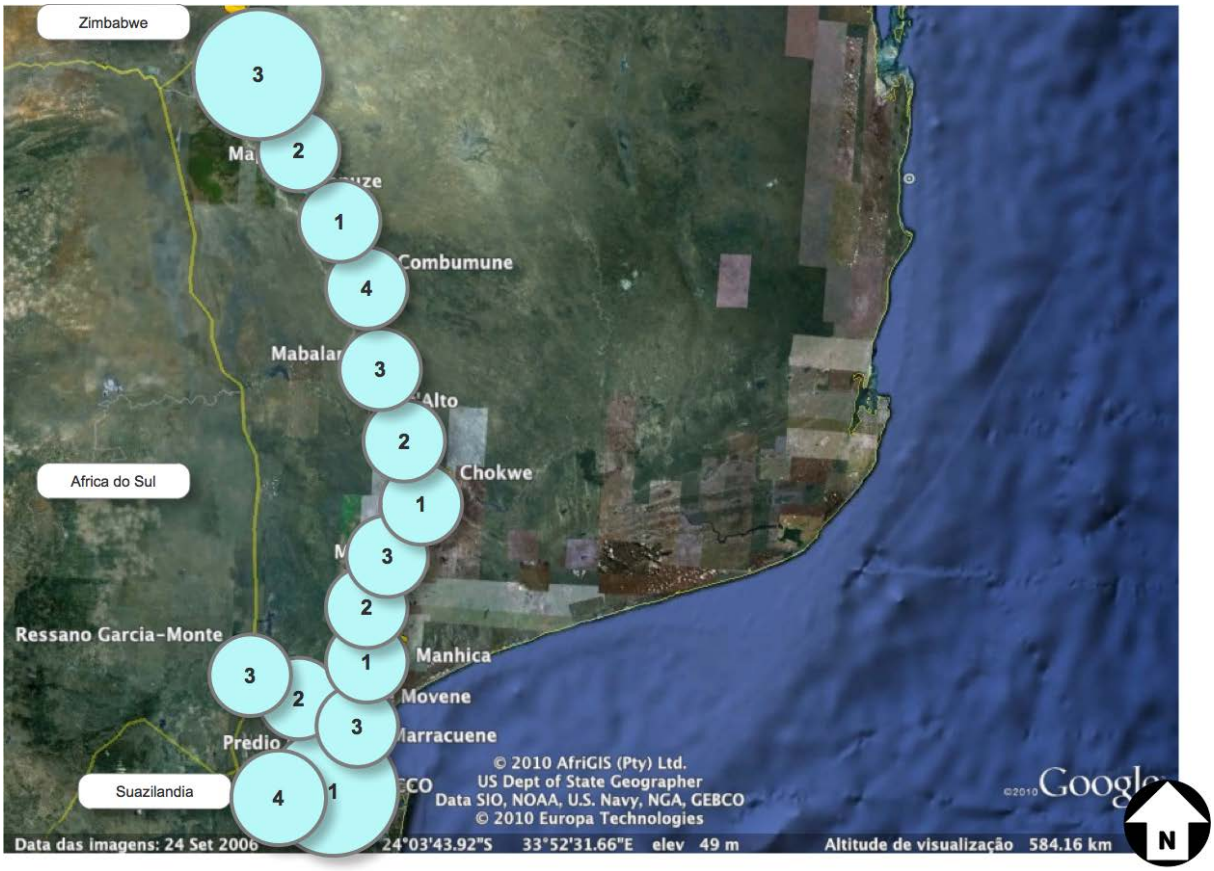


Figura 5.9: Repetição de frequências em células

O número de frequências disponíveis são suficientes para qualquer padrão de se deseje adoptar, podendo-se ir até ao limite de em cada célula se atribuir uma para a cada estação base. Contudo esta opção não seria a mais praticável. Em termos de interferências, não nos parece que seja possível que num futuro próximo, com a disponibilidade de frequências existentes, venha a existir este problema.

5.5 Fiabilidade

De forma que o sistema satisfaça os requisitos em determinado período, a fiabilidade para o sistema a instalar deverá ser analisada nos seguintes itens:

- Probabilidade de operação
- Concretização das funções previstas
- Suporte ao ambiente de funcionamento e
- Duração de funcionamento

Como forma de garantir que as funções acima indicadas serão cumpridas e das capacidades do equipamento escolhido, a rede, poderá ser construída na base da arquitectura TetraNode.

A arquitectura TetraNode, se baseia em nós. É uma arquitectura que suporta vários standards.

Os nós e as estações base podem ser interligados de forma a formar um anel ou em estrela, que permite que o sistema tenha redundância total. Esta tecnologia, utiliza o "*Soft-switch*" de forma a decidir a comutação mediante *software*, que para o caso em estudo é Linux. Esta arquitectura define propriedades comuns para a parte superior do *Stack* de protocolos que permite a integração de múltiplas interfaces aéreas. Uma camada de comunicações comuns pode ser definida para interligar diferentes tipos de estações no sistema [ROHI02].

TetraNode é uma arquitectura de rede distribuída. Os sistemas distribuídos têm uma fiabilidade elevada, comparados com os sistemas de canal de controlo. A figura 5.10 mostra as funcionalidades da arquitetura TetraNode.

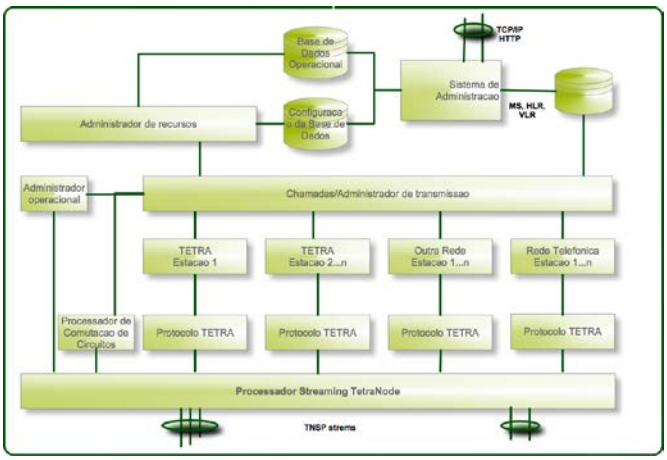


Figura 5.10: Arquitectura do Software (Extraído em [ROHI02])

A arquitectura é um ponto fundamental para suportar múltiplas interfaces aéreas. O software é baseado em *TetraNode Foudation Classes* (TFC), que é a base do processo de desenvolvimento do *software*. Nesta arquitectura, a transmissão de dados e voz pode ser

realizada sem dificuldades, recorrendo ao protocolo *TetraNode Streaming Protocol* (TNSP) para transmissões que requerem largura de banda baixa e nível de atraso baixo. Mediante este protocolo, poderão ser realizadas ligações entre as BSs a uma velocidade de 32 kbps [ROHI02].

5.6 Trabalhos a executar para instalação do sistema

A instalação de um sistema de telecomunicações exige um conjunto de actividades preliminares de forma a criar as condições materiais para a colocação dos equipamentos no terreno, o cumprimento de regulamentos nacionais e internacionais nos casos em que a altura das infra-estruturas necessárias ultrapasse uma dada medida (geralmente 30 m). A Tabela 5.31 mostra o conjunto de actividades a realizar nas infra-estruturas do CFM, de forma a se conseguir as condições necessárias para a instalação do sistema.

Grupo	Material e actividades	Maputo (Predio)	Movene	Ressano Garcia	Goba Monte (opcional)	Goba estação	Boane	Marracuene	Manhica	Ungubana	Motaze	Chokwe	Mont'Alto	Mabalane	Combumune	Mepuze	Mapai	Chicualacuala
Eletricidade e energia	Gabinetes de 19" (para 5 unidades)		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Baterias e baterias de back-up		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Protecção contra raios		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Terras		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Luzes (ICAO)		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Unidade de alimentação 24V		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Cabos/Guias de onda		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Torres	Nova torre		●															
	Fundação da torre e espiamento		●	●														
	Demolição da actual torre (velha)			●														
	Pintura da torre		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Substituição de espiamento						●											
	Substituição de parafusos e porcas						●											
	Elevação do terreno no local da instalação		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

	Calhas para cabos/guias de onda		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Shelter e Vedação	Novo shelter (3mX2,65)		•	•	•		•	•		•	•	•						
	Base para shelter		•	•	•		•	•		•	•	•						
	Vedação de palisado (12m X 10m X 2,40m)			•		•												
	Vedação de palisado (15m X 15m X 2,40m)		•				•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	Vedação de palisado (12m X 12m X 2,40m)				•													
Total de trabalhos e materiais			15	16	13	11	14	13	11	13	13	13	11	11	11	11	11	11

Tabela 5.31: Trabalhos a realiza

Capítulo 6

Conclusões

A escolha de um sistema de telecomunicações para o sector ferroviário é uma tarefa difícil devido diversidade de opções no mercado, contudo pouco expostos ao mercado ferroviário e a dificuldades de avaliar os sistemas em iguais condições. Neste capítulo, faz-se a apresentação da principais conclusões obtidas e o resumo do procedimento utilizado para determinar a melhor opção para os CFM.

6.1 Conclusões

No inicio desta dissertação, foi definido como objectivo principal o estudo de sistemas aplicados em ferrovias, a escolha de um sistema e o seu dimensionamento para servir de suporte ao sistema de controlo de tráfego do CFM Sul.

Inicialmente, começou-se por estudar os sistemas de comunicação usados especialmente para vias ferroviárias, desde os analógicos aos digitais e os sistemas de sinalização com recurso aos sistemas de telecomunicações. Ao verificar-se que os sistemas analógicos não são capazes de satisfazer os requisitos, optou-se por estudar apenas os sistemas digitais.

A decisão foi baseada na comparação dos seguintes sistemas:

	751-3	**GSM-R**	**TETRA**
Tecnologia	FM analógico	Digital TDMA	Digital TDMA
Frequência	460 MHz	900 MHz	400 MHz
Largura de banda por canal	25 kHz	25 Hz	6.25 kHz
Estabelecimento de chamadas	<1s	<10s	<1s
Facilidades de dados	Básico	Sim	Sim
Chamadas em grupo	Sim	Não	Sim
Modo directo	N/A	Não	Sim
Handover	Limitado	Sim	Sim
Roaming	Não	Sim	Sim
Encriptação	Não	Sim	Sim

Tabela 6.1: Comparação entre os sistemas ferroviários

Analisados os requisitos inicialmente dados para o sistema, procurou-se identificar aquele que menos infra-estrutura exige sem contudo baixar os níveis de segurança exigidos para um sistema ferroviário.

A tecnologia que se mostrou mais adequada, é a tecnologia TETRA, tendo sido realizado o dimensionamento para garantir a cobertura das linhas. O processo de dimensionamento, seguiu as seguintes etapas:

- **Dimensionamento da rede**: Neste estágio, foram realizados os cálculos teóricos para a cobertura da célula, baseados nos modelos de propagação recomendados pela ETSI [ETSI], para sistemas TETRA e nos parâmetros reais do equipamento. Este processo, permitiu-nos que obtivéssemos os dados necessários em relação aos seguintes aspectos:
  - **Frequências**: A análise de frequências, foi desenvolvida de forma que o sistema esteja livre de interferências. O conceito de reuso de frequências é aplicado de

forma realística de acordo com os resultados de análise de cobertura. Este planeamento foi realizado de forma a que se obtivesse melhor serviço em todos os locais, sem que haja nenhuma espécie de interferência.

- **Análise de Tráfego**: A análise de tráfego requer muitos dados de entrada, incluindo o número, distribuição, perfil dos utilizadores e grau de serviço (GoS) desejado. Como não dispomos de valores concretos da maior parte desses dados, foi feito uma estimativa, baseada no conhecimento da realidade local, que nos permitiu, obter o número de transceptores requeridos, do tráfego a servir, do correspondente grau de serviço e o número máximo de potenciais utilizadores que podem ser servidos pelo sistema.

Em termos numéricos, foi concluída a necessidade de instalação de 15 (TBS's) estações base, com uma portadora cada uma, e uma estação base com duas portadoras.

A arquitectura do sistema, será baseado em TetraNode e podendo ser realizado com o R-828 TetraNode eXchange (TNX), um poderoso controlador que suporta comunicações Multi-site entre múltiplos nós.

A principal dificuldade, residiu na definição de dados para o tráfego, e consequente determinação inequívoca de canais necessários para servir as necessidades da empresa.

6.2 Trabalhos futuros

Existe a necessidade de dimensionar uma rede ponto a ponto, para servir de rede de ligação entre as TBS's. Acreditamos nós, que esta rede, pode ser realizada na base de uma tecnologia qualquer a escolher. De forma a baixar os custos, poderá esta rede, ser desenhada para funcionar em banda não licenciada.

Acreditamos que este trabalho apresenta uma contribuição válida, na medida em que discute as principais tecnologias para ambientes ferroviários e indica entre essas tecnologias a que melhor se adequa às necessidades do CFM. Contudo, o estudo apresentado deverá ser alvo de uma validação em fase de projecto, tendo como base os dados a retirar do "*Site Survey*" a realizar; só então poderá ser assegurada a efectiva cobertura de todos os pontos e a correcta determinação do tipo e quantidades de material a fornecer. Também deverão ser definidos os sistemas de interacção do TETRA com os mecanismos de georreferenciação (GPS), uma vez que um dos objectivos é a visualização em painel mímico da localização exacta dos comboios.

Anexo 1

Características adicionais do GSM-R

O Anexo 1 descreve algumas características importantes do GSM-R, que o diferem do GSM e mostra o esforço que houve do projecto EIRENE para cobrir com os requisitos ferroviários.

Processo de desenvolvimento do Standard

O desenvolvimento do standard foi feito na base de dois grandes projectos: EIRENE e MORANE. No entanto uma grande parte do estabelecimento do standard foi feita pela ETSI, na base dos seguintes princípios:

- Enquadrar todos os requisitos ferroviários.
- Não desviar-se do standard do GSM.

A tecnologia GSM-R, é uma pequena especificação da tecnologia GSM Standard. Os equipamentos móveis do GSM-R tem diferenças com os do GSM standard e a nível do software existem também algumas diferenças. Contudo a maioria do software é similar ao GSM standard.

O equipamento de rede (Core equipamento) e idêntico ao equipamento do GSM standard.

Razões da adopção do GSM-R

O que motivou a escolha do GSM-R pela comunidade ferroviária europeia, foi o seu forte potencial em:

a. Suporte a numerosas aplicações devido ao carácter de rede ISDN.
b. Obter interoperacionalidade entre redes de comunicação ferroviárias.
c. Uso eficiente de numerosos recursos (frequência de rádio, cablagem, etc.).
d. Redução de custos de aprovisionamento (um só sistema leva tempo a existir num mercado adicional para os fornecedores de GSM).
e. Redução de custos de manutenção (Serviços de logística e de organização só para um único sistema).
f. Disponibilidade para evoluções técnicas (tecnologia em “estado de arte”).

A definição e normalização dos requisitos que definem o GSM são provenientes das aplicações pretendidas e de acordo com a fase 2 e 2+ da normalização do GSM. Esta situação envolveu organizações e entidades ferroviárias, o ETSI e parceiros industriais. A Figura a seguir mostra como estiveram organizados os grupos de especificação e validação do GSM-R.

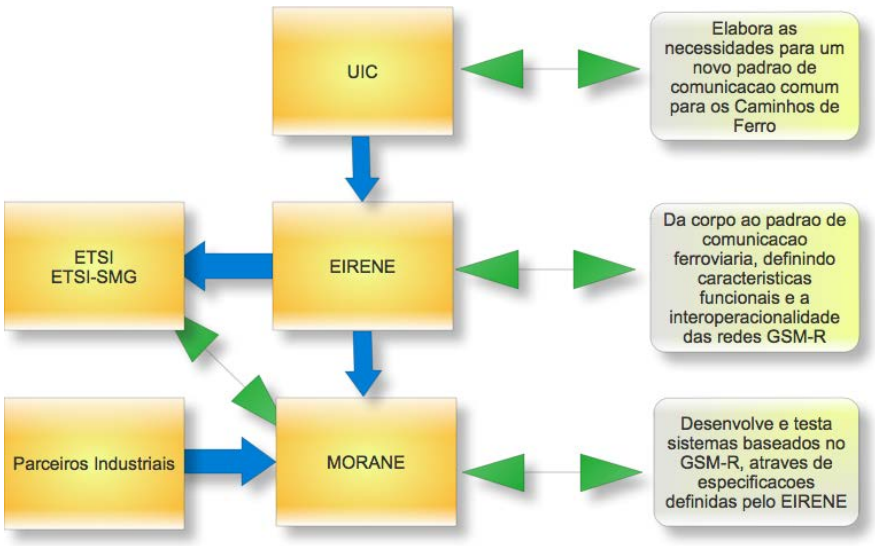


Figura A1.1: Fluxograma para Especificação e Validação do GSM-R

O MORANE (Mobile Rádio for Raiways Networks in Europe) é um consorcio de operadores ferroviários, fabricantes de elementos para o GSM e organizações de investigação. O Objectivo do projecto MORANE e dos seus ensaios localizados era de especificar e desenvolver requisitos, encontrados como necessários no sistema de comunicações ferroviário. O período de validação ficou completo em 1999.

Ambas as instituições, EIRENE e MORANE, elaboraram uma serie de especificações que permitem aos operadores ferroviários obter, individualmente, uma operação plena e validarem os novos produtos do sistema GSM-R.

As necessidades funcionais dos sistemas de comunicação ferroviárias podem ser divididas em duas secções:

1. Requisitos da EIRENE, normalmente definidos pelos transportes ferroviários europeus.
2. Requisitos específicos, provenientes das necessidades de cada operador ou pais.

A Figura 4, a seguir, a par do que foi discutido acima, estão as necessidades ferroviárias descritas pelo EIRENE, no desenvolvimento do GSM-R.

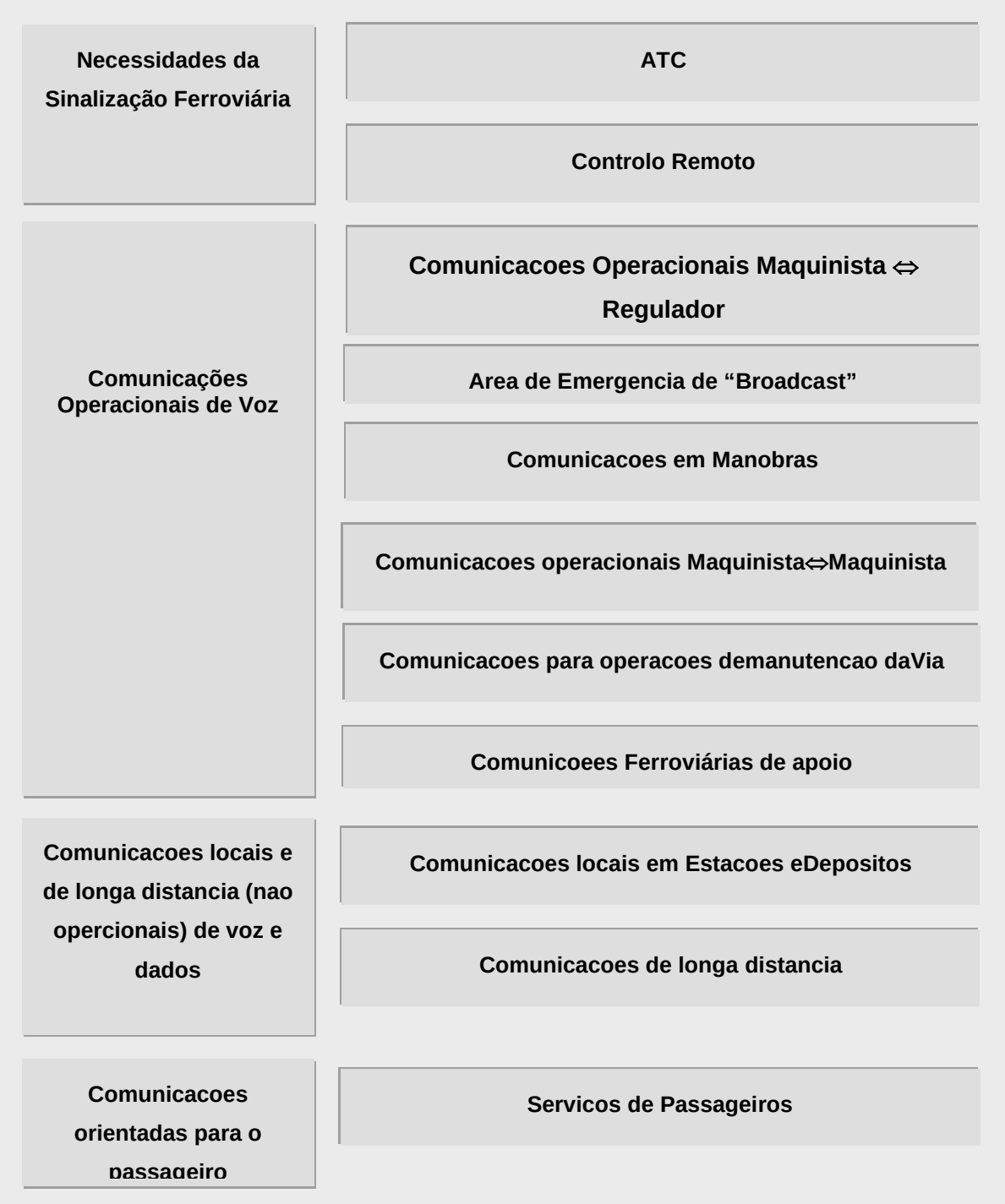


Figura A1.2: Aplicações do GSM-R, identificados pelo EIRENE

Neste projecto, o objectivo principal da UIC era o uso da banda do GSM-R para realizar comboios internacionais de alta velocidade, atravessando fronteiras terrestres sem necessidade de alteração de equipamentos. Para o conseguir, cada operador ferroviário, individualmente, teve de negociar com as entidades reguladoras nacionais de telecomunicações, a reserva desta banda de frequências. Contudo as bandas de frequência livres para o uso do GSM-R, podem diferir nalguns países, individualmente (especialmente

nos países não membros da UIC), devido a regulamentos nacionais. Existindo a necessidade das frequências do GSM-R, serem coincidentes e devido ao facto anteriormente mencionado, leva a necessidade da existência de realização de acordos. Se as frequências estiverem fora da banda do GSM-R, as aplicações do GSM serão possíveis, mas quando o tráfego se fizer através de uma fronteira terrestre poderá ficar sem funcionar devido a diferença dos limites das frequências.

Descrição da estrutura da rede GSM-R

O NSS (Swiching SubSystem) é baseado no sistema de comutação digital. Todas as funções de registo, como o VLR, HLR, EIR e GCR são realizadas como implementações de algoritmos de diversas plataformas. Isto dá aos operadores a oportunidade de seleccionar flexivelmente a estrutura do nó do GSM, dependendo do crescimento da rede e da estrutura organizacional. Na maior parte dos casos o MSC, o VLR, o EIR e o GCR serão instalados num único elemento da rede dedicada, com o futuro crescimento da rede. Isto inclui um bom custo efectivo e uma simpática manutenção da rede a saída. Usando elementos das redes públicas de comunicação móvel, garante-se um sistema de alta rentabilidade porque a redundância de hardware e as funções algorítmicas, para o tratamento de erros de hardware e de programação, estão já incluídos. Também estes elementos, estão largamente difundidos e tecnologicamente comprovados através de seu uso nas redes públicas ao longo de vários anos. Organizações de manutenção e de manutenção de canais de distribuição estão disponíveis e não serão necessários serem estabelecidos para as necessidades ferroviárias atuais. Isto é manifestamente uma redução do esforço de operação e de manutenção, para o operador.

A estrutura típica de uma rede típica GSM/GSM-R, baseada para a rede ferroviária, basicamente, não difere muito de uma rede PLMN normal e das suas extensões, em termos de elemento da rede, interfaces normalizadas e ligações. Existem diferenças na forma e no projeto da rede, devido as necessidades especiais, das redes ferroviárias. As necessidades especiais das redes de GSM-R, são devido as seguintes exigências das aplicações, usando o GSM-R:

- Comunicações sem falhas para velocidades até aos 500 Km/h.
- Uso eficiente do número de limitado de frequências (20).
- C/I (Carrier to Interference ratio) de 12 dB mínimo (O EIRENE exige 15 dB).
- 95% de cobertura para 95% do tempo numa cobertura de rede especifica, com um nível superior a -90dBm.
- Uma relação sucesso do handover, superior a 99,5%, mesmo entre redes GSM-R.
- Disponibilidade da utilização elevada, de ambos os caminhos de transmissão e equipamento de rede dependente das aplicações em uso.

- Cobertura dentro de túneis.
- Melhoria da cobertura nas estacões ferroviárias e nas zonas/áreas de manobras.
- Tempo de estabelecimento de chamada, como os abaixo indicados em 95% de todos os casos, ficando 5% em menos do em menos do que 1,5 vezes o período de tempo descrito.

Classe	Tipo de Chamada	Tempo de
Classe I	Chamada de Emergência Ferroviária	≤ 1s
Classe Ia	Chamada de Grupo urgente de Móvel para Móvel	≤ 2s
Classe II	Todas as operacionais cobertas pelas acima	< 5s
Classe III	Todas as chamadas de baixa prioridade	< 10s

Tabela A1.1. Tempos de estabelecimento de chamadas definidos pelo EIRENE

Estas exigências são mais ou menos aplicáveis para diferentes tipos de aplicações GSM-R.

Tipicamente, a rede de GSM-R é projectada com várias células elípticas, ao longo da via, com antenas direccionais, orientada na direcção da via. Dentro das estacões ferroviárias é exigido um aumento do tráfego ("pontos quentes"), enquanto que as necessidades em termos de velocidade, são reduzidas. Por isso, tipicamente, em estacões ferroviárias maiores, teremos células sectorizadas. Em áreas menos populacionais, com vias de baixa velocidade e ligações de autocarro, apenas se necessita, em média, de uma ligação de voz. Estas células podem radiar, como células omnidireccionais (áreas rurais sem ETCS).

A linhas ferroviárias regionais e autocarros de serviço ferroviário podem, ou usar o GSM público, ou deverão ser incluídos dentro de uma rede do GSM-R, passo-a-passo, para manter o investimento em níveis razoáveis. Por este motivo, a planificação das frequências terá de ser cuidadosamente ajustada, para permitir uma cobertura optimizada em ambos os casos, para o tráfego de longo curso, assim como, redução da cobertura para as linhas ferroviárias regionais, evitando assim a interferência intercelular.

Como resultado do critério anteriormente mencionado, a arquitectura típica de uma rede GSM-R, em ambos os sistemas SSS e BSS (Base Station Subsystem) usam redundâncias dadas como disponíveis, da tecnologia do GSM existente. Posteriormente alguns conceitos adicionais serão implementados como se demonstra de seguida. A Figura 7 e 8mostram estruturas realizadas com tecnologia existente e comum as redes públicas e na Figura 7 mostra-se uma proposta de estrutura de segurança muito elevada

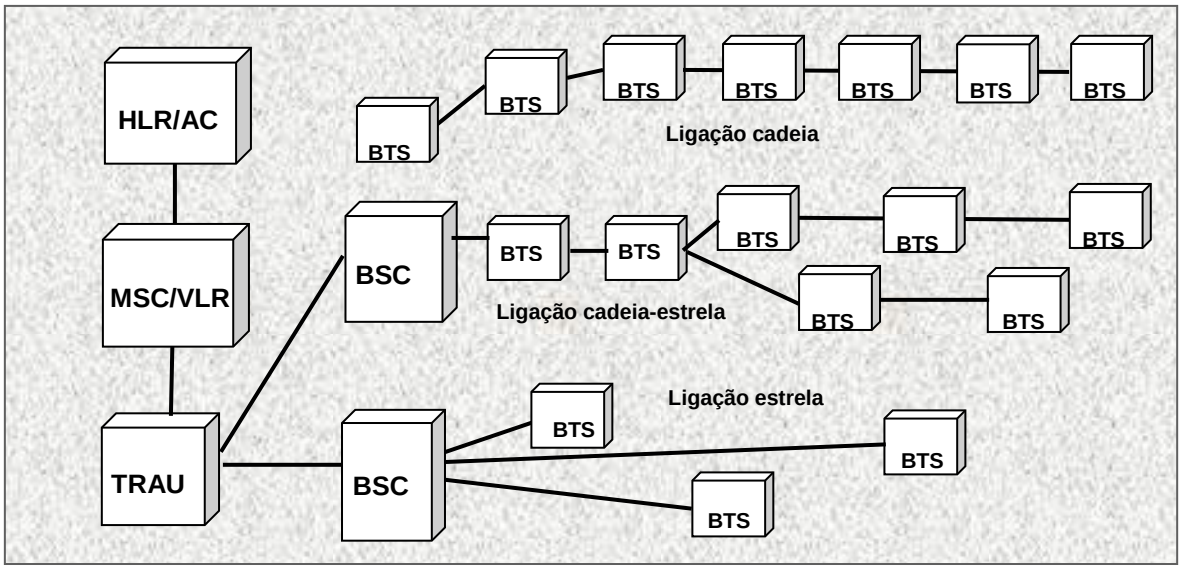


Figura A1.3: Arquitectura do GSM-R, para vias de baixa velocidade e áreas rurais

Ligação em estrela: As BTS estão ligadas ao BSC, numa ligação em estrela. Este tipo de ligação aplica-se especialmente para BTS sectorizadas com diversas portadoras.

Ligação em cadeia: As BTS estão ligadas ao BSC, sequencialmente, numa ligação em cadeia. Sempre que uma BTS ou ligação A_{bis} (interface entre o BSC e a BTS) esteja com problemas, um comutador de reles, através do PCM30, liga-se a próxima BTS. O comutador de ligação será comutado, sem falhas para a ligação.

Ligação em cadeia-estrela: As BTS estão ligadas ao BSC, numa ligação em cadeia-estrela, sequencialmente. As primeiras duas BTS estão ligadas em cadeia; depois da segunda BTS, existem várias cadeias ligadas em estrela. A vantagem esta numa melhor utilização dos cabos de comunicação ferroviária, existentes. Finalmente, em caso de falha da BTS, ou da ligação, e igual ao primeiro tipo de ligação descrito.

Para os casos anteriormente descritos, o caminho critico é sempre o cabo de ligação das BTS. Uma vez que, a segurança quer do fio de cobre, quer do cabo de fibra óptica, em combinação com a necessária terminação da linha (quer seja NTPM, *Modem-HSDL* ou *Drop-in-Drop out-multiplexer*), não é necessariamente tão alta como numa BTS e num BSC, e mesmo que, exista uma segurança da BTS muito alta, não iria aumentar o prazo de utilização do sistema.

Por isso, aplicações ferroviárias, com exigências elevadas de segurança, far-se-á uso de uma arquitectura em *loop* multi-sequencial. Além disso, a interligação das BTS em dois *loops* diferentes diminuirá as consequências de uma simples falha, de uma BTS ou de um BSC.

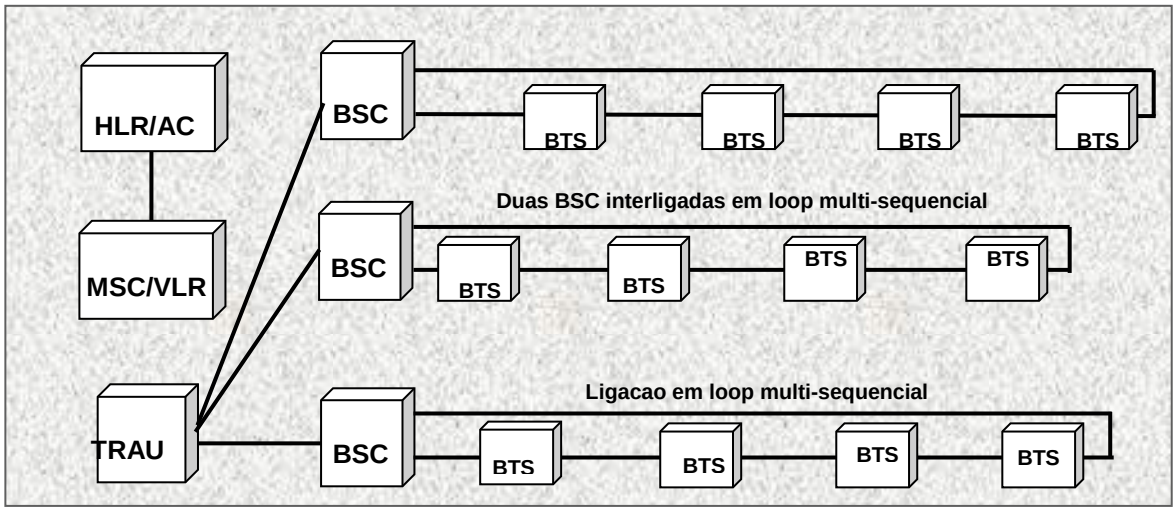


Figura A1.4: Arquitectura do GSM-R, para vias equipadas com ETCS

Ligação em *loop* multi-sequencial: As BTS estão ligadas num loop multi-sequencial. Fisicamente, poderão ser ligadas dessa maneira num loop, até 7BTS. Por razões de segurança, só 4 BTS são ligadas. Se a ligação de frente falhar, a BTS irá comutar, sem falhas, para a ligação da retaguarda. Isto significa que chamadas em linha não cairão, pela perda de uma ligação na transmissão.

No caso prescrito, o risco do cabo, como sendo o caminho critico, é reduzido. O operador pode agora escolher entre ligar dois cabos dedicados, mesmo que separados por um cabo blindado (solução de segurança), ou usar, ligações lógicas no anel da fibra óptica PDH/SDH, (solução económica).

Dois BSC interligados em loop multi-sequencial: As BTS estão ligadas a dois BSC diferentes em loop multi-sequencial, interligando-se uma a uma, entre si.

No caso descrito, ambos os riscos de falha do cabo e falha da BTS ou do BSC são reduzidos. Com um adequado planeamento da rede, esta células interligadas, podem ser planeadas quer como uma rede de *overlay/underlay*, usando a HCS (*Hierarchical Cell Struture*), com características comprovadas, ou como células vizinhas.

Todos os casos acima descritos, são tipos de ligações não modificadas, possíveis com o GSM da fase 2. Para receber, regularmente, com segurança elevada sem um único ponto de falha, no interior de GSM-R, a seguinte arquitectura devera ser seguida, ou seja, uma estrutura de rede totalmente duplicada.

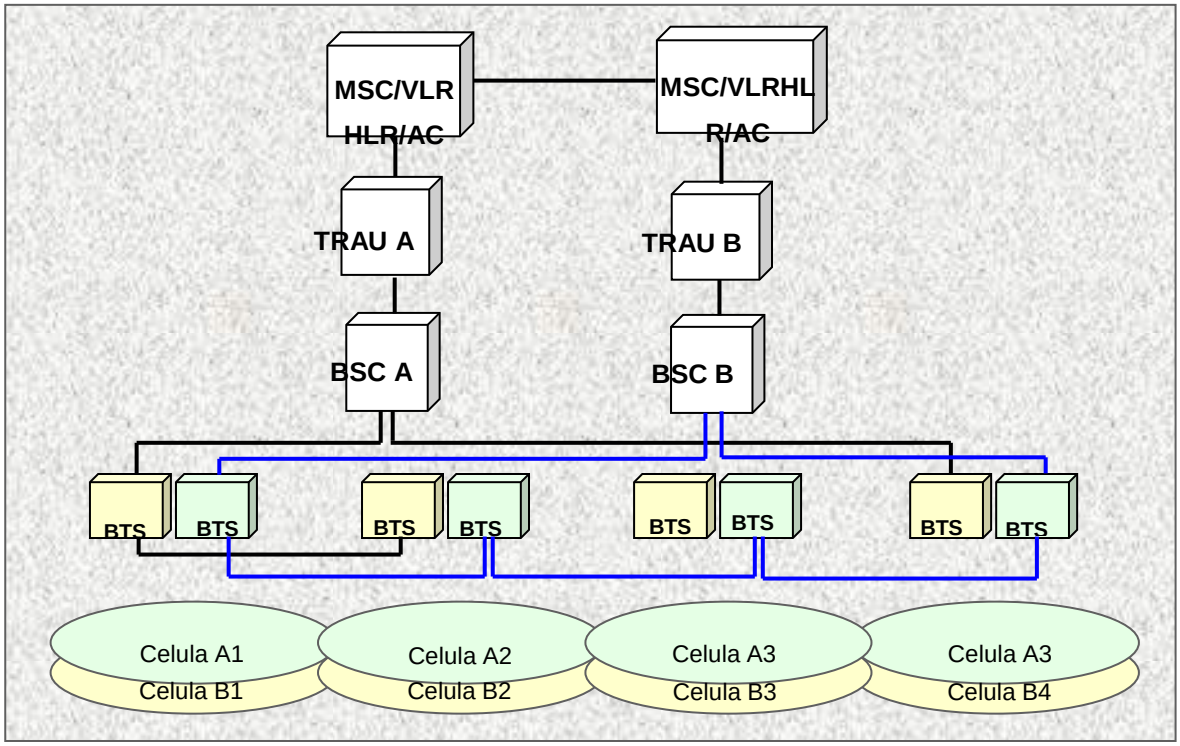


Figura A1 – 4: Estrutura de rede totalmente duplicada, com células de rádio overlay

O caso sugerido e mostrado na Figura 9, opera com a estrutura de rede totalmente duplicada, quer com células de rádio seguidas ou alteradas. Estes dois "níveis" de rede, permitem a existência de redundância, devido a necessidade de segurança. No entanto terá de ser definido os seguintes parâmetros, com o cliente/operador respectivo.

- Prioridade da célula A1 ou B1.
- Utilização de outros parâmetros hierárquicos de células.
- Administração de subscritores.
- Distribuição de potência.

Exigências de planeamento da rede de GSM-R

O planeamento da rede de comunicações para redes ferroviárias, tem de ter em conta, especialmente os seguintes critérios.

Aplicações de GSM-R e modelos de tráfego resultante: Os modelos do tráfego, das redes ferroviárias, diferem dos da rede móvel pública. Os subscritores terão uma maior BHCA, SCI e ainda um tempo de conversação mais longo.

Requisitos para a possibilidade de utilização: Como já foi mencionado, a possibilidade de utilização do canal rádio é um dos critérios chave para o GSM-R. Por isso, estruturas de rede redundante, tem que ser construídas, onde quer que seja realmente necessárias.

Topologia ferroviária: Uma típica topologia ferroviária inclui terreno plano e montanhoso. As tradicionais vias ferroviárias tem diversas curvas, mas com de novos trocos, está-se a tentar evitar curvas.

Velocidade do comboio: dependendo da máxima velocidade prevista para o comboio, o comprimento das zonas de handover necessitam de ser planeadas com muito cuidado.

Facilidades da transmissão e de *sites*: Em muitos casos, os operadores ferroviários, já tem facilidades de transmissão e sites das tradicionais redes analógicas, anteriormente construídas. Para a reutilizar esses sites, um conceito de migração necessitará de ser estabelecido.

Zonas de *handover*: As zonas de handover não deverão ser uma área elevada ou atingir uma posição do RBC. Dentro das estacões ferroviárias deverão ser reduzidas ao mínimo.

Conjunto de características adicionais e aplicações GSM-R

Adicionalmente às características decorrentes do GSM, o EIRENE/MORANE definiu características e funcionalidades que serão descritas seguidamente:

Função	Característica	Aplicação	Implementado em:
Banda de frequências do GSM-R	Deslocamento na frequência	Banda de frequências do EIRENE para tráfego internacional	BTS
	Numeração do canal de acordo com o GSM – Fase 2+	Operação na banda de frequências do EIRENE e banda de frequências do GSM padronizado	BTS
Equalizador desenvolvido	Equalizador para alta velocidade	Funcionalidades do GSM para moveis	BTS

Endereçamento dependente da localização	Encaminhamento orientado por células para números de marcação rápida	Encaminhamento das chamadas originadas no comboio, dependendo da localização do mesmo.	MSC/VLR e HLR/AC, planeado para uma IN
Endereçamento funcional	De seguimento (Follow Me)	Números funcionais para cada função do comboio, de acordo com o plano de numeração da EIRENE	MSC/VLR e HLR/AC, planeado para IN
Visualização de números funcionais	UUS.1, MOC e MTC	Visualização do número funcional, em vez do MSISDN, transporte de informação adicional	MSC/VLR
Chamada de voz de broadcast	Sistema de chamada de voz de grupo ASCI de acordo com o GSM 2+	Comunicação típica trunked rádio, ponto para multiponto, 1 emissor (MOC ou MTC), vários receptores, emissor seguinte. Será usada principalmente para chamadas de emergência ferroviária	MSC/VLR, HLR/AC, BSC e BTS, novo algoritmo de registo GCR no MSC

Chamada de voz em grupo	Sistema de chamada de voz de grupo ASCI de acordo com GSM-Fase 2+	Comunicação típica de trunked rádio, ponto para multiponto, vários expedidores (MOC ou MTC), vários receptores, emissor seguinte. Será usado para: Chamadas ferroviárias de emergência Comunicação entre equipa de manobradores Operações de manutenção da via	MSC/VLR, HLR/AC, BSC e BTS, novo algoritmo de registo de GCR no MSC
Estabelecimento rápido de chamada	Estabelecimento rápido de chamada dependendo da prioridade	Estabelecimento de chamada inferior a 1 segundo, conforme especificado no EIRENE, para chamadas ferroviárias de emergência	MSC/VLR, HLR/AC,BSC e BTS, novo elemento de rede GCR
Serviços Prioritários	eMLPP de acordo com GSM – Fase 2+	Gestão de níveis de prioridade de acordo com o EIRENE, isto e, pré-reserva de canais de tráfego de baixa prioridade para ETCS e chamadas ferroviárias de emergência no caso de todos os canais	MSC/VLR, HLR/AC, BSC e BTS, novo elemento de rede GCR

	MLPP como especificado para ISDN		Workstation do Regulador, PABX
Centro de confirmacao	Desenvolvido pelo ICNVD	Confirmação da VBS e VGCS de subscritores	PABX, ISDN-PC
TK-Box	Desenvolvido pela Siemens Transportation Systems	Para distribuir chamadas GSM-R no comboio para diferentes utilizadores	

Tabela A1 – 2: Características adicionais para GSM-R

Serviço de chamadas em grupo

Tal como o VBS, o VGCS esta introduzido no chamado teleserviço ASCI TS 91, como especificado na fase 2+ do GSM. Adicionalmente as funcionalidades prescritas no VBS, o VGCS e caracterizado pelo ponto chave que o emissor actual pode variar, durante a chamada.

Os membros do grupo, só ouvem normalmente o VGC, em curso. Assim que o emissor inicial do VGCS parar de falar, ele indica que libertou o *uplink*. Todos os membros do grupo serão notificados que podem agora requisitar um *uplink* para ser o próximo emissor através do uso da sua função *push to talk* (PTT).

Handover

O handover devera ser assegurado, que se realiza a 8 segundos de sobreposição. Tabela mostra faz a relação entre a velocidade e a distância de handover.

Velocidade (Km/h)	Distancia de handover [m]
60	140
120	270
160	360
200	450

Tabela A1 – 3: Relação entre a velocidade e a distância de realização com sucesso do handover

O LDA, é a estrutura de comando de circulação da linha, que irá condicionar a cobertura

celular. Prove a precisão na transição da célula.

Anexo 2

Descrição do sistema PTC

A arquitectura do tipo PTC**(Positive Train Control)**, é a arquitectura adoptada pelo CFM, por possuir características que facilitam aos CFM, implementar um sistema seguro e eficiente, sem se envolver em grandes investimentos. Neste anexo, descrevemos algumas características dos sistemas PTC.

Sistemas PTC (Positive Train Control)

Varias formas de interoperabilidade tem sido investigadas desde 1983 quando foi projectado o primeiro sistema ATCS (Advanced Train Control Systems).

Os sistemas de controlo de comboios tem sido utilizados para melhorar a segurança nos sistemas convencionais de controlo através da monitorização continua da posição do comboio e pela habilidade de forçar a paragem do comboio antes do obstáculo ou ponto que possa causar desastre. Desde essa altura, esses sistemas foram geralmente chamados **Posetive Train Control (PTC)**. Nos EUA, como forma de clarificação deste conceito, a administração federal dos caminhos de ferro, definiu como sistemas PTC, aqueles que simultaneamente tenham as seguintes características:

4. Prevenção de colisão entre comboios;
5. Imposição de restrições de velocidade, incluindo restrições da linha (curvas, pontes, etc.) e precauções temporárias.
6. Prover protecção ao pessoal que trabalha na via incluindo o equipamento através de ordens de avanço específicas.

Vários métodos de controlo de comboios tem sido experimentadas, baseados em informação não vital, informação vital e sistemas autónomos de informação vital. Os sistemas ICBS são utilizados como sistemas autónomos baseados em informação vital.

Objectivos

A AREMA (American Railway Enginnering and Maintenanve-of-Way Association), desenvolveu um manual de boas praticas dos sistemas de sinalização baseados em sistemas de comunicação. Neste manual, que demonstra como atingir os objectivos do PTC, muitos dos desenvolvedores de equipamento para sistemas vitais, seguem para desenvolver os seus sistemas e dessa forma obter a interoperabilidade.

Descrição do Projeto

O processo de definição do sistema CBS iniciou em 2005 através da conferencia de comunicações e sinalização da AREMA. Das companhias participantes, Alstom, General Electric Trasnportation Systems, Safetran Systems e a Union Switch and Signal, formaram um comité que foi conhecido por “committee 37” que em 2009, aprovou e foi públicado um manual de recomendações e praticas em sinalização e telecomunicações. Este manual é atualizado anualmente.

Em sistemas baseados em comunicações, o controlador envia pedidos a partir do computador de despacho (CAD) na central. O processador de sinalização (SLP) controla as alterações e estabelece rotas no momento tal como é feito num CTC convencional. Estas operações são realizadas usando informações vitais e princípios descritos no manual da AREMA. E importante notar que as solicitações realizadas a partir do CAD para o SLP não são parte do sistema vital sendo apenas solicitações de acções que tenha sido levadas a cabo. As mensagens atuais, não são executadas até que a informação vital com o SLP tenham concordado que devem ter lugar. Deste modo, as acções do SLP nesses pedidos, são feitos quando há necessidade de protecção e enviadas indicações a estacão da CAD, quando a solicitação estiver completa. Nestes pedidos de controlo e indicação de mensagens entre o CAD e o SLP podem existir os mesmos tipos de controlo e mensagens dos utilizados em sistemas convencionais.

O SLP envia comandos de controlo ao módulo WA (também referênciado como unidade de interface com equipamento ao longo da via), dá a posição e a alteração da posição. O onboard logic processor (OBLP) informa sobre a localização do bloco ocupado num determinado instante. O SLP determina para o bloco ocupado, as restrições temporárias, alterações de posição e rotas dentro do território e envia esta informação para o OBLP. Este por sua vez, através da base de dados que contém, visualiza a informação ao maquinista. Se o maquinista não cumprir com a informação visualizada, este calcula os excessos cometidos e solicita a frenagem da maquina.

Os sistemas baseados em comunicações, também podem permitir que o controlador a nível da central, determine os limites temporários da velocidade e indicações especificas nos locais onde existe trabalhos de via. Toda essa informação, é convertida pelo tradutor de dados para o formato utilizado pelo SLP, para que este determine o sinal apropriado para que possa ser enviado à locomotiva.

Sistema CAD

A nível da sala de controlo (CTC), o controlador usa este sistema para comandos e facilidades de gestão de tráfego a nível do território controlado. Funções especificas e operações ao nível da linha são directamente dependentes.

Tradutor

Traduz formulários com dados de via em funções e comandos adequados para que possam ser usados pelo SLP.

SLP (Siganaling Logic Processor)

O SLP, é responsável pela implementação dos princípios de sinalização. Esta calcula na base dos sinais apropriados os limites de velocidade e blocos virtuais, baseado na posição e direcção do comboio, a posição e direcção de outros comboios, definição dos limites de autorização de movimento, da posição estado e localização das transições e restrições temporárias de velocidade. Também responde pelas seguintes funções:

1. Conversão das mensagens recebidas (Via rede de comunicações) para informação apropriada de ocupação de bloco (Secção) dentro do SLP.
2. Conversão das mensagens recebidas (Via rede de comunicações) para unidade de interface com equipamento ao longo da via e em informação apropriada dentro do SLP.
3. Executar as operações necessárias para determinar o sinal vital para todos os blocos dentro da secção.
4. Converter o sinal recebido em mensagens em série (broadcasting) para enviar as locomotivas apropriadas.
5. Responder aos sinais não vitais e prover informação não vital ao sistema CAD.
6. Verificar se a locomotiva contem a última versão da base de dados critica.
7. Fazer interface com o tradutor.

Equipamento e aplicações ao longo da Via (WA)

Os equipamentos ao longo da via, incluem sinais, circuitos de via, controlos de cruzamentos, detectores de defeitos e equipamentos necessários para prover interface com o sistema de comunicações. O WA contém a unidade de interface com equipamento ao longo da via, que contem todo o equipamento necessário para fazer interface com todos sistemas tradicionais de sinalização e o sistema de sinalização baseado em comunicações. O WA é responsável pelas transições e determina o seu estado, dos circuitos de via e dos sinais actuais.

On Board Logic processor (OBLP)

O OBLP, é responsável por determinar se no comboio actual, a localização, velocidade, integridade do comboio, direcção se são as que estão contidas a nível da base dados tais como aspectos relacionados com os limites de velocidade recebidos via SLP ou de dispositivos locais. O OBLP, também

determina o excesso de velocidade, emite avisos ao maquinista e prove o cumprimento do que esta determinado.

Sistema de comunicações

A sinalização baseada em comunicações (CBS), utiliza uma infraestrutura física de comunicações. O protocolo das mensagens esta definido no manual da AREMA.

Para o CBS, a decisão tomada é de continuar a usar os protocolos ATCS. O ATCS responde perfeitamente as necessidades da industria actualmente. Os data gramas do ATCS, foram escolhidos no sentido de suportarem a performance e segurança necessária no sistema. Para utilização do endereçamento ATCS, não é obrigatório a utilização de frequências do ATCS em sistema de rádio. Os data gramas podem ser enviados através de outros sistemas, desde que suportem a performance desejada.

Infraestrutura de Base de Dados

A infraestrutura de base de dados define a infra-estrutura da linha, incluindo os circuitos de via (físicos ou virtuais), sinais e locais de transição. A base de dados, define as ligações existentes entre os circuitos de via, sinais, locais de transição, perfil de velocidade da linha, detectores de defeitos, cruzamentos. A base de dados, define tudo o que o CBS precisa saber como infra-estrutura fixa.

Anexo 3

Características da antena a instalar nas estações base

Tendo em conta que se pretende realizar a cobertura apenas ao longo da linha e sobre as estações, as características das antenas devem apenas responder a esses requisitos. Neste anexo, estão descritas as características das antenas a instalar.

Panel 380–470
Dual Polarization X
Half-power Beam Width 65°
Adjust. Electr. Downtilt 2°–16°

set by hand or by optional RCU (Remote Control Unit)

XPol Panel 380–470 65° 14dBi 2°–16°T

KATHREIN
Antennen · Electronic

TETRA/
TETRAPOL

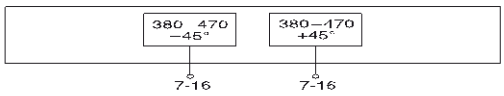
Directional

Type No.	800 10403	
Frequency range	380–470	
	380 – 430 MHz	430 – 470 MHz
Polarization	+45°, –45°	+45°, –45°
Gain (dBi) Tilt	13.5 ... 13 ... 12.5 2° ... 9° ... 16°	14 ... 13.5 ... 13 2° ... 9° ... 16°
Half-power beam width Copolar +45°/–45°	Horizontal: 66° Vertical: 22°	Horizontal: 62° Vertical: 19°
Electrical tilt	2° – 16°, continuously adjustable	
Front-to-back ratio, copolar (180° ±30°)	> 25 dB	
Cross polar ratio 0° Maindirection ±60°	Typically: 25 dB > 10 dB	
Isolation	> 30 dB	
Impedance	50 Ω	
VSWR	< 1.5	
Intermodulation IM3	< –150 dBc (2 x 43 dBm carrier)	
Max. power per input	400 W (at 50 °C ambient temperature)	

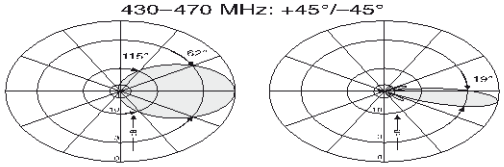
Material: Radiator: Tin-plated copper.
Reflector screen: Weather-proof aluminum.
Radome: Fiberglass, colour: Grey.
All screws and nuts: Stainless steel.

Ice protection: Due to the very sturdy antenna construction and the protection of the radiating system by the radome, the antenna remains operational even under icy conditions.

Grounding: The metal parts of the antenna including the mounting kit and the inner conductors are DC grounded.



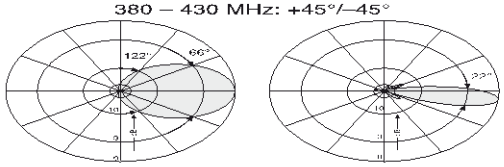
430–470 MHz: +45°/–45°



Horizontal Pattern

Vertical Pattern
2°–16° electrical downtilt

380 – 430 MHz: +45°/–45°



Horizontal Pattern

Vertical Pattern
2°–16° electrical downtilt

Mechanical specifications	
Input	2x 7-16 female
Connector position	Bottom
Adjustment mechanism	1 x, Position bottom continuously adjustable
Weight	19 kg
Wind load	Frontal: 1200 N (at 150 km/h) Lateral: 440 N (at 150 km/h) Rearside: 2000 N (at 150 km/h)
Max. wind velocity	200 km/h
Packing size	Approx. 2250 x 630 x 215 mm
Height/width/depth	1999 / 575 / 199 mm

21

Referências

[ETSI10] ETSI. *Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 2: Air Interface (AI).* Shophia Antiopolis Cedex, France, 2010. (www.etsi.org/deliver/etsi_en/en_30039202v020302p.pdf)

[Corr09] Correia, Luís M. *Comunicações Móveis.* Lisboa, Portugal. 2009.

[DuGi99] Dunlop, John., Demissie Girma., and James Irvine., *Digital Mobile Communications and the TETRA System.* John wiley & Sons, Baffins Lane, UK, 1999.

[ETSI97] ETSI. *Terrestrial Trunked Radio (TETRA); V+D; Designers Guide: Part 1: Overview Tecnical Description and radio Aspects.* ETSI Tecnical Report ETR 300-1, Valbonne, FRANCE, 1997. (www.etsi.org/deliver/etsi_etr/300_399/…/etr_30001e01p.pdf)

[ETSI04] ETSI. *Terrestrial Trunked Radio (TETRA); (V+D); TETRA frequency bands, duplex spacings and chanel numbering.* Tecnical Specification. Shophia Antiopolis Cedex, FRANCE, 2002-04. (www.etsi.org/deliver/etsi_ts/..../ts_10039215v01020p.pdf)

[GaLe08] Garcia., Criastina Rico., Andreas Lehner., Tomas Strang, and Korbinian Frank., *Channel Model for Train to Train Communication using the 400 MHz Band*. 2008. (http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabss/Channel Model for Train to Train Communication using the 400 MHz Band.pdf)

[Garg07] Garg, Vijay. *Wireless Comunications and Networking.* Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, USA, 2007.

[Ghah07] Ghaham, Adrian W. *Mobile Radio Network Design in the VHF and UHF Bands, A pratical approach.* Jonh Wiley and Sons, Ltd, London, UK, 2007.

[Eire06] EIRENE. *UIC Project EIRENE Functional Requeriments*

*Specifications.*2006.
(www.transportstyrelsen.se/global/jarnvag/.../eirene_frsv7.pdf)

[Hile99] Hilenbrand, Wolfagang. GSM-R The Railways Integrated Mobile Communications. (www.tds.org/ tds.org/gsmr_description.doc)

[Katt04] Katterling, Hans-Peter A. *Introduction to Digital Professional Mobile Radio.* Artech House, Nowood,MA, 2004.

[Kurn99] kurner, Thomas. *Digital mobile radio towards future generation system.* Final report, European commission, Brussels, Belgium 1999.

[MeLe10] Meyer, Phillip, e Leon Pienarr. *Communications Based Signalling Systems ERTMS and Alternative Systems*. África Rail Conference, Johannesburg, SA, June 2010.

[Misj07] Misjra, Ajay R. *Advanced Cellular Network Planing and Optimisation 2G/2.5G/3G....Evolution to 4G.* Jonh Willey & sons Ltd, West Sussex,UK, 2007.

[Pali09] Palit, S. K. “Design of Wireless Communications Sensing Networks for Tunels, Trains and Buildings.” *Internation Journal on Smart Sensing and Inteligent Systems*,Vol 2, No. 1, March, 2009, pp17.

[Sale09] Salema, Carlos. *Uma Introdução as Telecomunicações com Mathematica.* IST Press, Lisboa, Portugal. 2009.

[OATC10] http://www.tds.org/oatc, jun. 2010

[TETR10] TETRAMOU. *TETRA Standard.* (http://www.tetramou.com)

[WeHu02] Wentong, Xu, Xiang Huige, e Yang Honggie. “*TETRA protocol interfaces and potential applications in railway*.” (http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabss/Tetra protocol interfaces and potential applications in railway.pdf)

[ROHI02] ROHILL,TETRANODE
(www.alcon.com.br/pdf/whitepaper_migration_MPT_to_TETRA.pdf)

Bibliografia

[Stav07] P. Stavroulakis. Terrestrial Trunked Radio – TETRA. A Global Security Tool. Springer, NY, USA. 2007

[Webb99] Webb, William. The Complet Wireless Comunications Professional: A Guide for Enginners and Managers. Artech House,Norwood, MA 1999.