

**CENTRO UNIVERSITARIO DE BELO HORIZONTE  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**

CRISTIANO TORRES DO AMARAL

OUTROS TRABALHOS EM:  
[www.projetoderedes.com.br](http://www.projetoderedes.com.br)

**REDE DE RÁDIO DIGITAL DE SEGURANÇA PÚBLICA:  
ESTUDO DE CASO PARA A COPA DO MUNDO DE FUTEBOL  
EM BELO HORIZONTE**

BELO HORIZONTE

2010

CRISTIANO TORRES DO AMARAL

**REDE DE RÁDIO DIGITAL DE SEGURANÇA PÚBLICA:  
ESTUDO DE CASO PARA A COPA DO MUNDO DE FUTEBOL  
EM BELO HORIZONTE**

BELO HORIZONTE

2010



## CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BELO HORIZONTE

Departamento de Ciências Exatas e de Tecnologia

Campus Estoril

Trabalho Final de Conclusão de Curso intitulado *Rede de Rádio Digital de Segurança Pública: Estudo de Caso para a Copa do Mundo de Futebol em Belo Horizonte*, de autoria do aluno **Cristiano Torres do Amaral**, aprovado pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

---

Prof. Msc. Pedro José Rosa de Oliveira  
Orientador

---

Prof. Msc. João da Rocha Medrado Neto

---

Prof<sup>a</sup>. Msc. Vanessa Cristina Lopes Santos

Belo Horizonte, 06 de dezembro de 2010.

# DEDICATÓRIA

*À minha linda e inteligente filha Marina...*

## **AGRADECIMENTOS**

*Aos meus pais que me concederam o dom da vida e sabedoria necessária para  
superar todos os desafios;*

*À Polícia Militar de Minas Gerais, em especial ao amigo e Chefe, Coordenador  
dos Cursos Técnicos de Formação Militar e Engenheiro Eletricista Coronel  
Adilson de Oliveira Prado, que me proporcionou o incentivo necessário para  
superar todos os obstáculos em minha carreira profissional e acadêmica;*

*À Motorola do Brasil, em especial aos Diretores Bruno Nowak e Márcio  
Albuquerque, que prestigiaram a apresentação deste trabalho no Centro  
Universitário de Belo Horizonte e gentilmente apresentaram relevantes  
sugestões para ampliação destes estudos junto ao Mestrado em Engenharia  
Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais;*

*Ao meu Professor Orientador, Pedro Rosa, que confiou em meu trabalho na  
produção deste texto e revisou-o de maneira minuciosa para que pudesse ser  
apresentado com segurança ao UNIBH.*

*“Em tudo dai graças, porque esta é a vontade  
de Deus em Cristo Jesus para convosco”*

***( I Tessalonicenses 5:18)***

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo geral a análise de viabilidade de implantação de um sistema de rádio digital para utilização pelas forças de segurança pública de Belo Horizonte durante a Copa do Mundo de Futebol de 2014. Para tanto, este trabalho foi estruturado para obter, ao final, um projeto da rede de rádio digital, sendo formatado em quatro capítulos: o primeiro descreve os objetivos, justificativas e metodologia do trabalho; o segundo capítulo estabelece a concepção da solução, descrevendo os aspectos teóricos que sustentam o projeto, como parâmetros da tecnologia escolhida e suas particularidades técnicas para implementação em Belo Horizonte; para, em seguida, o terceiro capítulo apresentar o projeto básico, propondo a rede de rádio digital para segurança pública na Copa de 2014. Ao final, são apresentadas as considerações finais deste estudo, analisando os resultados obtidos e propondo estudos futuros.

**Palavras-Chave:** Predição, Radiocomunicação, TETRA.

## **ABSTRACT**

This study aims at examining the overall feasibility of implementing a digital radio system for use by the public security forces in Belo Horizonte during the World Cup Soccer 2014. Therefore, this study was structured to obtain the final design of a digital radio network, and is formatted into four chapters: the first describes the objectives, justifications, and methodology of work, the second chapter provides the design solution, describing the theoretical aspects that underpin the project, as parameters of the chosen technology and its technical details for implementation in Belo Horizonte, for then the third chapter shows the basic design, offering the digital radio network for public safety in the 2014 World Cup. Finally, it is present the final considerations of this study, analysis of the results and future studies.

**Keywords:** Prediction, Radiocommunication, TETRA.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 – 1ª Copa do Mundo de Futebol</b>	<b>11</b>
<b>Figura 2 – Seleção da Copa do Mundo de 2014</b>	<b>13</b>
<b>Figura 3 – Perímetro de Segurança para a Copa de 2014 em Belo Horizonte</b>	<b>14</b>
<b>Figura 4 – Rádio Transceptor Analógico VHF</b>	<b>15</b>
<b>Figura 5 – Etapas do Planejamento da Rede de Radiocomunicação</b>	<b>20</b>
<b>Figura 6 – Comunicação <i>Two-Way</i> LMR</b>	<b>23</b>
<b>Figura 7 – Rádio Troncalizado</b>	<b>25</b>
<b>Figura 8 – Lista de Especificações do Padrão TETRA</b>	<b>29</b>
<b>Figura 9 – Página da Associação TETRAMoU</b>	<b>30</b>
<b>Figura 10 – Busca de Documento Técnico TETRA no Sítio da ETSI</b>	<b>32</b>
<b>Figura 11 – Equipamento TETRA pelo Exército Alemão</b>	<b>33</b>
<b>Figura 12 – Equipamentos TETRA dos Jogos Pan-Americanos de 2007</b>	<b>34</b>
<b>Figura 13 – Diagrama de Ligação da Rede dos Jogos Pan-Americanos de 2007</b>	<b>35</b>
<b>Figura 14 – Formatação dos Quadros de Voz + Dados TDMA/TETRA</b>	<b>38</b>
<b>Figura 15 – Formatação dos Blocos Voz + Dados TDMA/TETRA</b>	<b>46</b>
<b>Figura 16 – Processo de Chamada Individual TETRA V+D</b>	<b>47</b>
<b>Figura 17 – Protocolos de Comunicação da Rede TETRA V+D</b>	<b>48</b>
<b>Figura 18 – Método de Modulação <math>\pi/4</math>DQPSK</b>	<b>49</b>
<b>Figura 19 – Diagrama de Ligação da Rede TETRA V+D</b>	<b>51</b>
<b>Figura 20 – Autenticação da Estação Móvel na Rede TETRA V+D</b>	<b>54</b>
<b>Figura 21 – Estação Base TETRA</b>	<b>60</b>
<b>Figura 22 – Disposição das Estações Base TETRA</b>	<b>61</b>
<b>Figura 23 – Handover TETRA</b>	<b>62</b>
<b>Figura 24 – Disposição das Estações Base TETRA</b>	<b>63</b>
<b>Figura 25 – Diagrama em Blocos da Estações Fixa TETRA</b>	<b>64</b>

<b>Figura 26 – Diagrama em Blocos do Processador CML/TETRA</b>	<b>66</b>
<b>Figura 27 – Diagrama em Blocos do CODEC-CML/TETRA</b>	<b>67</b>
<b>Figura 28 – Antena e Fonte de Alimentação da Estação Fixa</b>	<b>68</b>
<b>Figura 29 – Antena da Estação Móvel Veicular</b>	<b>70</b>
<b>Figura 30 – Teste do Modo de Economia de Energia da Estação Portátil</b>	<b>72</b>
<b>Figura 31 – Equipamentos Comerciais TETRA</b>	<b>73</b>
<b>Figura 32 – Topologia de Cluster com 7 Células</b>	<b>81</b>
<b>Figura 33 – Área de Cobertura Desejável da Rede de Rádio na Copa de 2014</b>	<b>84</b>
<b>Figura 34 – Cobertura da Célula do Entorno do Mineirão – Base para Móvel</b>	<b>87</b>
<b>Figura 35 – Cobertura da Célula do Entorno do Mineirão – Móvel para Base</b>	<b>88</b>
<b>Figura 36 – Topologia da Rede TETRA para a Copa de 2014</b>	<b>90</b>
<b>Figura 37 – Localização das Estações Base no Entorno do Mineirão</b>	<b>94</b>
<b>Figura 38 – Modelo de Estrutura Básica para as Estações Base</b>	<b>95</b>
<b>Figura 39 – Antenas para as Estações Base e Fixas</b>	<b>97</b>
<b>Figura 40 – Torre de Telecomunicação</b>	<b>97</b>
<b>Figura 41 – Tabela de Cabos</b>	<b>98</b>
<b>Figura 42 – Modelo de Conectores</b>	<b>99</b>
<b>Figura 43 – Combinador Multibanda</b>	<b>100</b>
<b>Figura 44 – “<i>Rofftop</i>” - Antenas Sobre a Edificação</b>	<b>101</b>
<b>Figura 45 – Shelter/Abrigo para Estações Base</b>	<b>102</b>
<b>Figura 46 – Sistemas de Energia Reserva</b>	<b>105</b>
<b>Figura 47 – Protetores Elétricos</b>	<b>106</b>
<b>Figura 48 – Kit para Montagem da Malha de Aterramento</b>	<b>107</b>
<b>Figura 49 – Estrutura do Gateway TETRA</b>	<b>108</b>
<b>Figura 50 – Centro de Coordenação e Controle</b>	<b>110</b>
<b>Figura 51 – Estação de Despacho de Rádio</b>	<b>111</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Níveis de interoperabilidade</b>	<b>31</b>
<b>Tabela 2 – Classificação de Eficiência Espectral dos Padrões de Rádio Digital Existentes no Mercado Mundial</b>	<b>40</b>
<b>Tabela 3 – Descrição das Camadas da Rede TETRA</b>	<b>45</b>
<b>Tabela 4 – Algoritmo de Encriptação TETRA</b>	<b>53</b>
<b>Tabela 5 – Funções do Microcontrolador na Estação Fixa TETRA</b>	<b>65</b>
<b>Tabela 6 – Parâmetros Utilizados para Dimensionamento do Tráfego</b>	<b>78</b>
<b>Tabela 7 – Canais Disponíveis para Licenciamento</b>	<b>79</b>
<b>Tabela 8 – Coordenação de Frequências</b>	<b>81</b>
<b>Tabela 9 – Pontos Críticos de Segurança em Belo Horizonte</b>	<b>82</b>
<b>Tabela 10 – Parâmetros Utilizados para Predição</b>	<b>88</b>
<b>Tabela 11 – Pontos Sugeridos para Instalação de Estações Base</b>	<b>91</b>
<b>Tabela 12 – Características dos Componentes da Linha de Transmissão e Sistema Irradiante</b>	<b>100</b>
<b>Tabela 13 – Características de Carga dos Abrigos Principal e Adjacente</b>	<b>103</b>
<b>Tabela 14 – Total do Investimento no Projeto</b>	<b>112</b>

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>AC</b>	Centro de autenticação – sigla em inglês
<b>ACELP</b>	Codificador com Predição Linear Excitado com Código Algébrico
<b>ADC</b>	Analógico para Digital
<b>ANATEL</b>	Agência Nacional de Telecomunicações
<b>BR</b>	Rádio Base – sigla em inglês
<b>BSC</b>	Controladora de estações base – sigla em inglês
<b>BSCH</b>	Canal de Sincronismo de “Broadcasting” – sigla em inglês
<b>BSS</b>	Subsistema de estações base – sigla em inglês
<b>BTS</b>	Estação base transceptora – sigla em inglês
<b>CCC</b>	Centro de Coordenação e Controle
<b>CCK</b>	Requisição de Autenticação Comum – sigla em inglês
<b>CMCE</b>	Entidade de controle do modo de circuito – sigla em inglês
<b>COPOM</b>	Centro de Operações Policiais Militares
<b>DAC</b>	Conversor Digital para Analógico
<b>DCK</b>	Requisição Dinâmica de Autenticação – sigla em inglês
<b>DMO</b>	Modo de operação direto na rede TETRA – sigla em inglês
<b>EEM</b>	Modo de Economia de Energia – sigla em inglês
<b>EIR</b>	Registro de identificação de equipamento – sigla em inglês
<b>EMBRAPA</b>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<b>ESMR</b>	Sistema Ampliado de Rádio Móvel Especializado – sigla em inglês
<b>ETSI</b>	Instituto Europeu de Padronização de Telecomunicações – sigla em inglês
<b>FDMA</b>	Acesso múltiplo por divisão de frequência – sigla em inglês
<b>FIFA</b>	Federação Internacional das Associações de Futebol – sigla em francês
<b>FIFO</b>	Primeiro a Entrar – Primeiro a Sair – sigla em inglês
<b>FS</b>	Estação Fixa – sigla em inglês
<b>GCK</b>	Grupo de Usuários Doméstico – sigla em inglês
<b>GMSC</b>	Canal de acesso ao Centro de Roteamento dos Móveis – sigla em inglês
<b>GPS</b>	Sistema de Posicionamento Global – sigla em inglês.
<b>GSM</b>	Sistema global para comunicação móvel – sigla em inglês
<b>HDB</b>	Banco de Dados Local – sigla em inglês
<b>HDV</b>	Banco de Dados de Visitantes – sigla em inglês
<b>HLR</b>	Registro local doméstico – sigla em inglês
<b>HT</b>	Hand-Talk
<b>KS</b>	Chave de encriptação – sigla em inglês
<b>LLC</b>	Controle de acesso médio – sigla em inglês
<b>LS</b>	Estação de linha – sigla em inglês
<b>LMR</b>	Rádio Móvel Territorial – sigla em inglês
<b>LTR</b>	Rádio Troncalizado Lógico – sigla em inglês
<b>MAC</b>	Controle de acesso médio – sigla em inglês
<b>MM</b>	Gerenciamento de mobilidade – sigla em inglês
<b>MS</b>	Estação móvel – sigla em inglês
<b>MSC</b>	Centro de roteamento dos móveis – sigla em inglês
<b>NSS</b>	Subsistema de roteamento e rede – sigla em inglês
<b>NTIA</b>	Agência Nacional de Administração de Telecomunicações e Informação norte-americana – sigla em inglês

<b>ONU</b>	Organização das Nações Unidas
<b>OSI</b>	Organização de Padronização Internacional
<b>OTAR</b>	Processo de mudança de chave de encriptação pela interface aérea – sigla em inglês
<b>PD</b>	Pacote de dados – sigla em inglês
<b>PAMR</b>	Rádio Móvel de Acesso Público – sigla em inglês
<b>PMR</b>	Rádio Móvel Profissional - sigla em inglês.
<b>QPSK</b>	Modulação por chaveamento diferencial de quadratura de amplitude e fase – sigla em inglês
<b>RAND1</b>	Número aleatório criado na autenticação da rede TETRA
<b>RES</b>	Resultado do processamento de autenticação na rede TETRA
<b>RF</b>	Radiofrequência
<b>RS</b>	Assinatura de referência na rede TETRA
<b>R1</b>	Validação da autenticação
<b>RX</b>	Recepção
<b>SAFECOM</b>	Departamento de Gestão das Comunicações de Segurança dos Estados Unidos – sigla em inglês
<b>SCH</b>	Canal de Sinalização – sigla em inglês
<b>SCK</b>	Encriptação Estática – sigla em inglês
<b>SIM-Card</b>	Cartão de identificação de usuário – sigla em inglês
<b>SLMP</b>	Serviço Limitado Móvel Privativo
<b>SMR</b>	Rádio móvel especializado – sigla em inglês
<b>SRTM</b>	Shuttle Radar Topography Mission
<b>SwMI</b>	Infraestrutura de Gerenciamento e Roteamento
<b>TA</b>	Algoritmo de encriptação TETRA – sigla em inglês
<b>TDMA</b>	Acesso múltiplo por divisão de tempo – sigla em inglês
<b>TETRA</b>	Rádio Troncalizado Terrestre – sigla em inglês.
<b>TETRAMoU</b>	Memorando de Entendimento TETRA – sigla em inglês
<b>TMO</b>	Operação em modo troncalizado na rede TETRA – sigla em inglês
<b>TSC</b>	Controladora de Sítio – sigla em inglês
<b>TX</b>	Transmissão
<b>USGS</b>	United States Geological Survey
<b>V+D</b>	Voz e dados na rede TETRA
<b>VLR</b>	Registro local de visitantes – sigla em inglês
<b>VS</b>	Estação Veicular – sigla em inglês
<b>XRES1</b>	Resultado de conferência para autenticação na rede TETRA

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução</b>	<b>11</b>
1.1 Objetivos	17
1.2 Hipóteses	17
1.3 Justificativas	18
1.4 Metodologia	18
1.5 Organização do Trabalho	21
<b>2. A Tecnologia de Rádio Digital TETRA</b>	<b>22</b>
2.1 Histórico	22
2.2 Interface Aérea e Gestão do Espectro	36
2.2.1 Interface Aérea	36
2.2.2 Gestão do Espectro	43
2.3 Modulação e Criptografia	44
2.3.1 Modulação	48
2.3.2 Criptografia	51
2.4 Equipamentos TETRA	57
2.4.1 Estação Base	58
2.4.2 Estação Fixa	64
2.4.3 Estação Móvel Veicular	69
2.4.4 Estação Móvel Portátil	70
2.4.5 Equipamentos Comerciais	72
<b>3. Projeto da Rede Digitalizada</b>	<b>74</b>
3.1 Dimensionamento das Estações Base	77
3.2 Análise da Área de Cobertura	82
3.3 Levantamento dos Pontos de Repetição	89
3.4 Estrutura dos Sítios de Estações Base	95
3.4.1 Sistema Irradiante	95
3.4.2 Abrigos	102
3.4.3 Sistema Elétrico	103
3.5 Centro de Coordenação e Controle	107
<b>4. Considerações Finais</b>	<b>112</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>114</b>

## Capítulo 1

### *Introdução*

A primeira Copa do Mundo de Futebol foi realizada em 1930 no Uruguai, sendo proposta pelo presidente da Federação Internacional das Associações de Futebol (FIFA – sigla em francês), Jules Rimet (1873-1956), durante a realização do congresso anual da entidade, em 1928, em Amsterdã, Holanda.

A competição pioneira foi organizada com participação de 16 seleções convidadas, sem a disputa de eliminatórias continentais tal como ocorre atualmente. Desde então, o torneio passou a ocorrer a cada quatro anos em países diferentes, com exceção aos períodos de 1942 e 1946, isso em função da suspensão ocorrida pela Segunda Guerra Mundial (Barretto Filho, 2009).



(a) Pôster do 1º Campeonato Mundial de Futebol da FIFA

(b) Jules Rimet entrega a Taça ao Representante da Equipe Vencedora - Uruguai

Figura 1 – 1ª Copa do Mundo de Futebol  
Fonte: FIFA, 2010.

A Copa do Mundo de Futebol da FIFA é um dos maiores eventos esportivos do mundo, comparando-se apenas às Olimpíadas. Atualmente, existe a antecedência mínima de 06 anos para escolha do país sede, sendo este, o prazo necessário para adaptação e desenvolvimento da infraestrutura e serviços para o evento nas cidades-sedes. De acordo com a sistemática atual de escolha dessas cidades, o país interessado, submete à FIFA a sua candidatura, por meio de sua federação de futebol nacional.

O documento de submissão à candidatura do país sede contém um projeto básico, indicando possíveis cidades-sedes, apoiado em um “*Caderno de Encargos*”, documento no qual são definidas as necessidades básicas do evento e comprometimento com as exigências da entidade internacional organizadora. Nessa proposta são detalhadas as responsabilidades relacionadas ao atendimento de emergência, alimentação, capacidade de acomodação hoteleira, meio ambiente, saúde, transporte, infraestrutura esportiva e, principalmente, segurança pública (Barretto Filho, 2009).

Após a entrega da proposta do país candidato, são realizadas visitas de inspeção por representantes da FIFA, para avaliação do projeto e, ao final, são votados os projetos de candidatura. Eventualmente, se algum item da proposta submetida não for aprovado nessa inspeção, a FIFA elimina automaticamente a candidatura do país interessado (Barretto Filho, 2009).

O Brasil é o único país que já participou de todas as edições do evento, no entanto, sediou apenas um campeonato, em 1950. Entretanto, em 30 de outubro de 2007, o Brasil teve sua proposta para sediar a Copa do Mundo de Futebol aceita e, em 31 de maio de 2009, a FIFA divulgou as 12 cidades-sedes do evento:



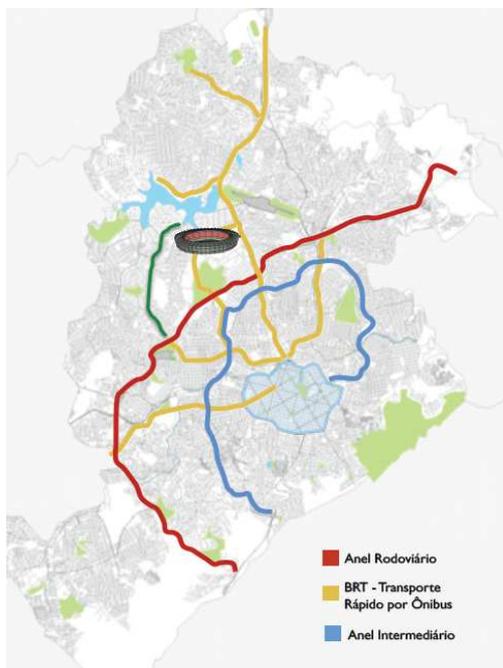
**Figura 2 – Seleção da Copa do Mundo de 2014**  
**Fonte: FIFA, 2010.**

No Caderno de Encargos aceito pela FIFA para o Brasil estão previstos cenários nos quais estão incluídas as 12 cidades-sedes e, entre essas cidades, Belo Horizonte. Nesse documento são considerados o entorno e toda uma infraestrutura de suporte ao evento. Entre algumas exigências, destacam-se a limitação de acesso ao local das partidas em um raio de cerca de 2 km; proibição de estacionamento em via pública (vias principais de acesso e ao perímetro bloqueado); controle de identificação das pessoas nas vias de acesso ao estádio; e rotas com faixas de circulação exclusiva para veículos de emergência e policiamento (Barretto Filho, 2009).

No caso de Belo Horizonte, os Governos Federal, Estadual e Municipal estão atuando conjuntamente para essa intervenção, especialmente no segmento de Segurança Pública, prevendo a instalação de câmeras digitais de monitoramento, controle de acesso eletrônico e um grande projeto de mobilidade urbana para a cidade (Lacerda, 2009).

De acordo com os números iniciais, o projeto de mobilidade urbana e “cidade segura” devem alcançar investimentos na ordem de 2,5 milhões de reais

(Lacerda, 2009). Esses projetos visam disponibilizar a infraestrutura necessária para estabelecer um perímetro de segurança durante o evento:



(a) Vias de Acesso de Municipais



(b) Vias de Acesso Metropolitanas

**Figura 3 – Perímetro de Segurança para a Copa de 2014 em Belo Horizonte**  
**Fonte: Lacerda, 2009.**

Tal como ocorreu na Copa da Alemanha, em 2006, nesse perímetro de segurança das cidades-sedes, são esperadas cerca de 3 milhões de pessoas, as quais devem se alojar e deslocar para participarem do evento. Essas pessoas são turistas e/ou prestadores de serviços temporários (comerciantes, jornalistas, médicos, etc.). A manutenção da segurança dessas pessoas nesse perímetro será realizada por uma estrutura específica de policiamento ostensivo, o qual deverá se estabelecer nessa área delimitada, e seu entorno, antes, durante e depois do evento (Lacerda, 2009).

Para tanto, a estrutura policial existente deverá ser adaptada a essa

realidade, expandindo e re-elaborando os recursos humanos e logísticos que serão empregados. Nessa análise, inicialmente, verifica-se que as comunicações das forças de defesa social deverão ser priorizadas, uma vez que serão essenciais para a realização das tarefas de coordenação e controle que deverão ser implementadas para a garantia da Segurança Pública nesse evento (Anastasia, 2009).

Nessa discussão verifica-se que o sistema de comunicação atual está baseado em uma plataforma de rádio analógica na faixa de *Very High Frequency* (VHF) que foi instalado a partir da década de 1970. Trata-se de um sistema obsoleto e vulnerável, no qual interceptações e interferências estão susceptíveis às estações de rádio que integram essa rede de defesa social (Molinari, 2005). A Figura 4, abaixo, apresenta um modelo de rádio transceptor analógico utilizado pelas forças de segurança no Brasil:



**Figura 4 – Rádio Transceptor Analógico VHF**  
Fonte: Motorola Inc.

Para superar esse déficit por comunicações mais seguras durante eventos internacionais, bem como seu cotidiano no enfrentamento ao crime organizado,

as forças brasileiras de defesa social estão investindo em sistemas de comunicações baseadas nas plataformas de rádio digital. Nesses sistemas, além dos canais de voz digitalizados, também são utilizados tele-serviços de criptografia, monitoramento automático de frota de veículos por satélite (GPS/AVL), envio e recebimento de mensagens de textos, entre outros serviços adicionais que tornam mais eficientes e eficazes o trabalho de gestão da segurança em grandes eventos internacionais.

No entanto, a digitalização nesse segmento não representa uma inovação tecnológica de Rádio Móvel Profissional (PMR – sigla em inglês), mas ao contrário, uma defasagem tecnológica que vai sendo suprida a cada grande evento internacional, seja no Brasil ou no mundo. Em 2007, um sistema de rádio digital foi instalado no Rio de Janeiro, o qual adotou o padrão *Terrestrial Trunked Radio* (TETRA) para apoiar as comunicações de segurança pública durante a 15ª edição dos jogos Pan-americanos na capital carioca (ANATEL, 2007).

No ano seguinte, esse mesmo padrão foi escolhido para a 24ª edição dos jogos olímpicos de Beijing, na China (RRMAG, 2008). Em ambas as metrópoles globais, os sistemas de comunicação de segurança pública encontravam-se defasados tecnologicamente, operando, em sua grande maioria, com uma plataforma analógica na faixa de VHF.

Considerando esse retrospecto tecnológico, durante a preparação para a Copa do Mundo de Futebol de 2014, em Belo Horizonte, estudos nesse sentido não seriam diferentes. Para tanto, este trabalho almeja contribuir nessa discussão, sendo delimitado pelas áreas temáticas de “*comunicações móveis*” e “*infraestrutura de telecomunicações*”. Além disso, ele apresenta uma proposta de

projeto de rádio digital para utilização pelas forças de defesa social durante esse mega evento internacional na capital mineira.

### **1.1 Objetivos**

Este trabalho tem por objetivo geral a análise de viabilidade de implantação de um sistema de rádio digital para utilização pelas forças de segurança pública de Belo Horizonte durante a Copa do Mundo de Futebol de 2014, tendo como objetivos específicos:

- i) Identificar o número de terminais fixos, móveis e portáteis adequados para atendimento das comunicações do efetivo policial ostensivo empregado durante o evento;*
- ii) Identificar a topologia e pontos de repetição da rede que serão necessários para obtenção da cobertura plena das comunicações no perímetro de segurança estabelecido para o evento;*
- iii) Definir a canalização apropriada para suprir a demanda de comunicações no evento;*

O produto final deste trabalho será obtido por meio da consolidação de um Projeto Básico, que deverá descrever e propor especificações mínimas para rede de rádio digital para segurança pública na Copa de 2014.

### **1.2 Hipóteses**

As questões norteadoras deste trabalho são:

- i) As comunicações analógicas são vulneráveis às interceptações das*

*mensagens e às interferências, portanto, não seriam apropriadas para utilização pelas forças de defesa social durante a Copa do Mundo de Futebol de 2014;*

*ii) As comunicações com rádio digital possuem recursos de criptografia e apresentam-se mais robustas às interceptações e interferências nas mensagens, portanto, uma rede de rádio digital seria mais adequada para uso pelas forças de defesa social durante a Copa do Mundo de Futebol;*

*iii) A instalação de uma rede de rádio digital de segurança pública apresentar-se-ia viável para a Copa do Mundo de Futebol de 2014.*

### **1.3 Justificativas**

Este trabalho se justifica pela relevante contribuição técnica junto às discussões de adequação, modernização e preparação da infraestrutura de segurança pública no país para um dos maiores eventos internacionais que deverão ocorrer na capital mineira nos próximos anos.

Além disso, esse trabalho poderá subsidiar outros estudos nesse segmento que, de maneira direta ou indireta, também devem colaborar para a modernização tecnológica dos órgãos de segurança Pós-Copa do Mundo, servindo de maneira mais eficiente e eficaz a sociedade.

### **1.4 Metodologia**

Segundo Molinaro (2005:28), o projeto de uma rede de rádio para segurança pública deve seguir três passos básicos: *(i) planejamento; (ii) execução*

e (iii) *gerência*. De acordo com essa premissa, e as limitações impostas para a realização deste projeto, este trabalho limita-se às discussões da etapa de planejamento da rede de rádio digital. Essa limitação refere-se à impossibilidade de aquisição dos equipamentos, sua instalação e administração, isto é, atribuições das etapas de execução e gerência respectivamente.

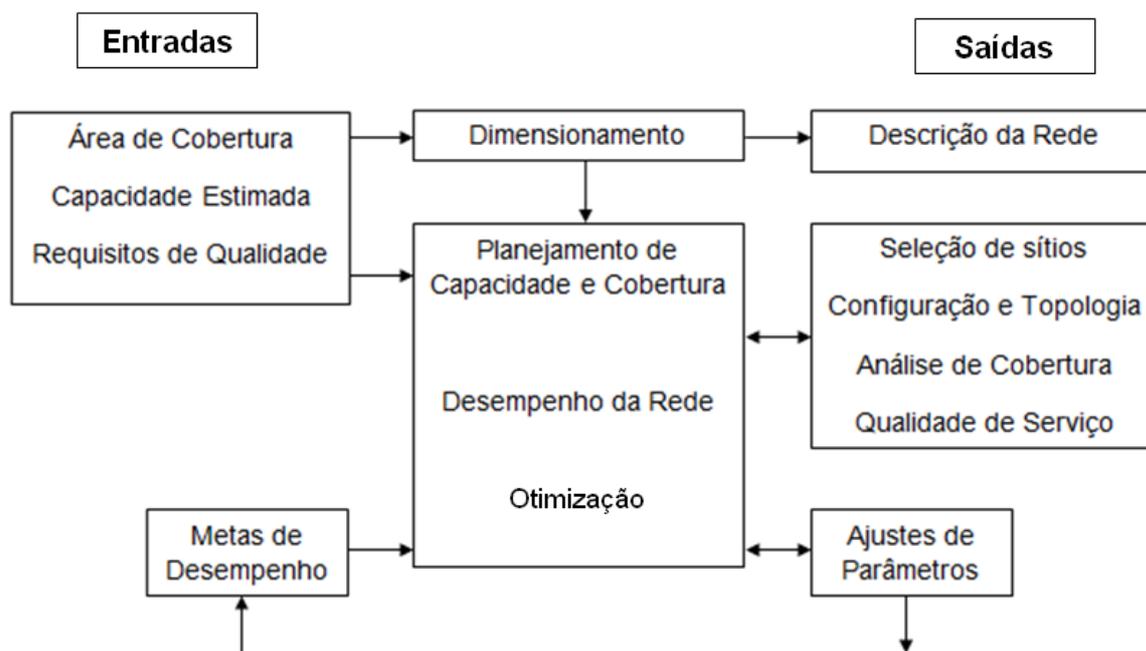
Nesse sentido, estudo de caso deverá apresentar as etapas relativas ao planejamento do projeto da rede de rádio digital, seguindo os passos abaixo:

- a) *Etapa de Análise do Problema;*
- b) *Etapa de Concepção da Solução;*
- c) *Especificação Técnica do Projeto.*

De acordo com as etapas acima elencadas, a primeira fase do projeto se inicia com a análise do problema, isto é, delimitação do perímetro de segurança, a área de cobertura desejada e a sua respectiva demanda por comunicações para o evento, as quais foram descritas no texto introdutório.

Em seguida, será definida a tecnologia a ser adotada e a solução mais apropriada para o caso de Belo Horizonte. Por fim, o projeto será descrito por meio de uma especificação técnica básica.

Essas etapas também foram propostas por Toskala (2004:186) por meio de um fluxograma de planejamento estratégico, com entradas, saídas e parâmetros de coordenação e controle. Esse fluxograma pode ser avaliado na Figura 5, a seguir:



**Figura 5 – Etapas do Planejamento da Rede de Radiocomunicação**  
**Fonte: Adaptado de Toskala (2004:186).**

Nesse planejamento do projeto, as entradas são definidas pela área de cobertura desejada no perímetro de segurança para a Copa de 2014, a capacidade de terminais estimada para o evento e os requisitos de qualidade desejáveis. De acordo com essas entradas será feito um dimensionamento da rede a partir do planejamento da capacidade/cobertura e o desempenho da rede esperado.

Nesse esquema de etapas de projeto, o produto final será obtido com a descrição da rede, por meio da seleção dos locais de sítios de repetição, configuração/topologia da rede, área de cobertura e qualidade de serviço. Ainda assim, também são estabelecidas metas de desempenho e parâmetros de medição para o planejamento adequado do projeto.

## **1.5 Organização do Trabalho**

Nesse sentido, este trabalho foi estruturado para obter, ao final, o projeto da rede de rádio digital em quatro capítulos, sendo o primeiro descritivo dos objetivos, justificativas e metodologia; o segundo capítulo estabelece a concepção da solução, descrevendo os aspectos teóricos que sustentam o projeto, como parâmetros da tecnologia escolhida e suas particularidades técnicas para implementação em Belo Horizonte; para, em seguida, o terceiro capítulo apresentar o projeto básico, propondo a rede de rádio digital para segurança pública na Copa de 2014. Ao final, são apresentadas as considerações finais deste estudo, analisando os resultados obtidos e propondo estudos futuros.

## Capítulo 2

### ***A Tecnologia de Rádio Digital Troncalizado Terrestre (TETRA)***

Neste capítulo serão discutidos os aspectos teóricos que sedimentam o projeto para a rede de rádio digital de segurança pública que poderá ser utilizada durante a Copa do Mundo de Futebol de 2014, em Belo Horizonte.

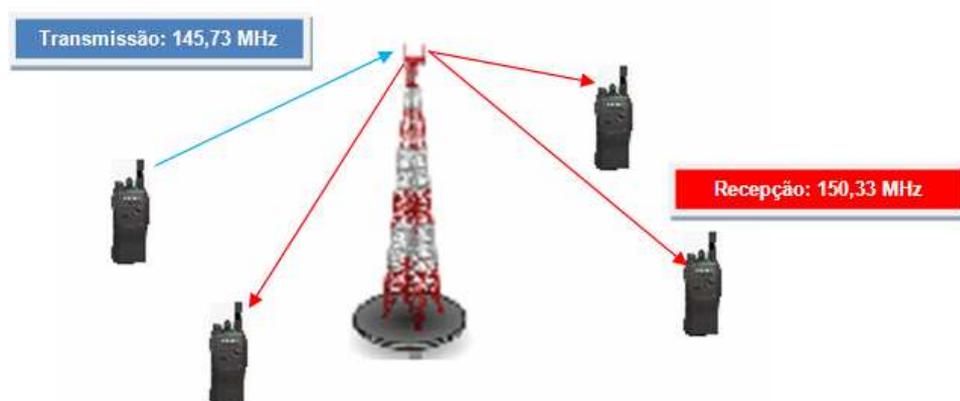
Nesse sentido, o texto foi estruturado de maneira a descrever tecnicamente a solução tecnológica proposta, detalhando suas particularidades e destacando os argumentos que justificam a sua escolha.

Para tanto, ao longo deste capítulo, será feito um breve resgate histórico da tecnologia TETRA para, em seguida, analisar a interface aérea, gestão do espectro, modulação digital e criptografia do padrão de rádio troncalizado. Por fim, são descritas as especificações recomendáveis para os equipamentos da rede, considerando a segmentação da infraestrutura em dois subsistemas, sendo um composto por Estações Fixas e Móveis, e o outro, de Estações Base TETRA e seus enlaces de interconexão.

#### **2.1 Histórico**

Os sistemas de comunicação da era moderna têm evoluído significativamente nos últimos anos, principalmente com o advento das técnicas de modulação digital. No final dos anos 60, os segmentos públicos e particulares que desejavam se

comunicar em uma área geográfica específica utilizavam redes analógicas privadas de Rádio Móvel Territorial (*Two-Way* LMR – adaptado da sigla em inglês). Nesses sistemas, as comunicações são feitas em canais com pares de frequências fixas para transmissão e recepção das mensagens, em que a estação transmissora ocupa totalmente o canal, enquanto a receptora reproduz a mensagem do canal *half-duplex*<sup>1</sup> (Harte, 2003). A Figura 6, a seguir, apresenta o croqui de uma rede *Two-Way* LMR, onde uma estação móvel transmite em 145,73MHz e as demais, por meio do repetidor, recebem a mensagem em 150,33MHz:



**Figura 6 – Comunicação *Two-Way* LMR**

---

<sup>1</sup> Na comunicação *simplex* a estação transmissora envia para todas as estações da rede as mensagens, sem a possibilidade de retorno das mensagens enviadas pelas estações receptoras. Esse sistema é o mesmo utilizado pelas emissoras de rádio comercial AM e FM e telemensagens (*paging*). Por sua vez, na comunicação *half-duplex* a estação transmissora envia as mensagens e, se desejar, a estação receptora pode usar o canal de comunicação ao final do recebimento completo da mensagem. Na rede que possui canais *half-duplex*, as estações possuem um dispositivo que possibilita o envio das mensagens apenas quando a estação de origem não está recebendo nenhuma mensagem da rede ou a de destino não está transmitindo. Esse dispositivo é o “*Aperte para Falar*” (*Push-to-Talk* – original em inglês) que faz o chaveamento entre o circuito receptor e transmissor da estação. Esse sistema é utilizado pelos órgãos de segurança pública e outras entidades públicas e privadas. No caso do envio e recebimento de mensagens simultaneamente, as estações da rede utilizam canais *full-duplex*, isto é, que possuem pares de frequência dedicados, onde existe uma frequência para transmitir as mensagens e outra para receber simultaneamente. Esse sistema é utilizado, entre outros segmentos, na telefonia celular (Harte, 2004).

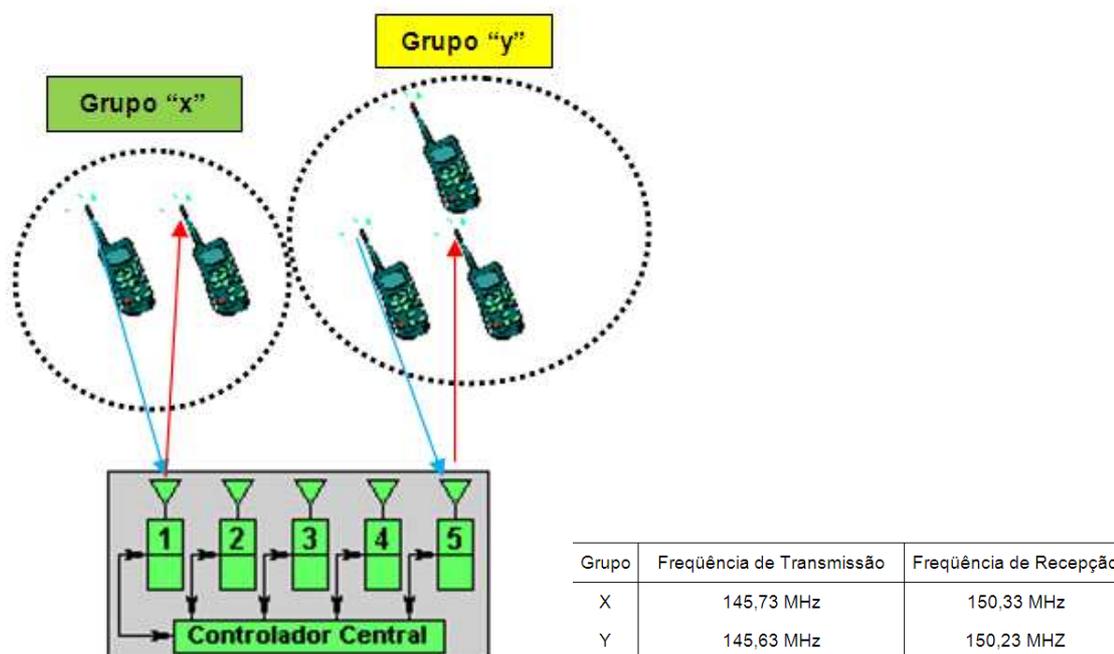
O sistema da Fig. 6 era frágil, pois a cobertura ficava limitada a área de atendida pelo sítio de repetição dos sinais das estações móveis e fixas. Além disso, as comunicações estavam passíveis de interceptações clandestinas, uma vez que as comunicações trafegam em pares de frequências fixas sem qualquer tipo de proteção (Harte, 2003).

Considerando esses fatores, na década de 70, na América do Norte, foram desenvolvidos os sistemas de Rádio Móvel Especializado (SMR – sigla em inglês), onde vários sítios de repetição foram instalados em uma grande área territorial para ampliar a cobertura da rede. Entretanto, nesse sistema a repetidora utiliza não um, mas vários rádios repetidores, que recebem as mensagens das estações móveis e fixas, e retransmitem simultaneamente em diferentes pares de frequência (Harte, 2004).

Nesse processo de comutação instantânea entre o receptor e o transmissor, os equipamentos seguem uma seqüência lógica que é compartilhada com todas as outras estações da rede para acesso múltiplo por divisão de frequência dos canais disponíveis (FDMA). Dessa maneira, as estações sabem em qual frequência devem transmitir e receber num determinado instante de tempo. De acordo com Harte (2004) essa tecnologia ficou conhecida como Rádio Troncalizado Lógico (LTR – adaptado do sigla em inglês).

Essa técnica utiliza o mesmo conceito das centrais telefônicas públicas comutadas, o qual serve para comutação entre troncos e ramais. Trata-se de um sistema “*Troncalizado de Rádio*” (Trunking) que pode ser observado na Figura 7, a seguir. Nesse exemplo, existem dois grupos que acessam dinamicamente cinco repetidores controlados eletronicamente. Os repetidores enviam para as estações

a sinalização indicando qual repetidor está disponível e as estações móveis acessam a rede de acordo com essa alocação dinâmica. No exemplo abaixo, as estações móveis de dois grupos de usuários (“X” e “Y”) utilizam pares de frequências distintas para acessarem repetidores alocados dinamicamente pelo controlador central.



**Figura 7 – Rádio Troncalizado**

Os sistemas troncalizados analógicos evoluíram por diferentes caminhos tecnológicos, entre esses, o Sistema Ampliado de Rádio Móvel Especializado (ESMR – adaptado do inglês). Na Europa, concomitantemente, o Ministério de Correios e Telégrafos do Reino Unido publicou a normatização 1327 para designar seu protocolo de rádio troncalizado. Esse protocolo de rádio analógico recebeu o nome de MPT -1327 (Stavroulakis, 2007).

Todos esses avanços ajudaram os clientes das redes de comunicações privadas a obter maior cobertura e acesso de suas estações, no entanto, todas

essas mensagens continuavam vulneráveis. Isso ocorre porque, no sistema troncalizado, basta obter a seqüência lógica de comutação da central controladora, isto é, entender o funcionamento do protocolo de comutação, para reconstruir esse processo na estação clandestina e resgatar as mensagens da rede (Jones, 2002).

Ainda assim, outro aspecto que também chamava a atenção no sistema troncalizado analógico SMR está ligado ao fato dele utilizar pares de freqüências para comunicação entre duas estações com acesso múltiplo em freqüência (FDMA). Trata-se de um fator complicador para a ampliação dessas redes, uma vez que o espectro de rádio está limitado aos diferentes serviços de telecomunicações, entre esses, o próprio SMR (Jones, 2002).

Essas dificuldades foram paulatinamente superadas com a implementação das técnicas de modulação digital desenvolvidas ao longo dos anos 60 e 70. Foram introduzidas novas técnicas no final dos anos 80 e que permitiram o desenvolvimento de processos para compactar as mensagens e protegê-las contra interceptações clandestinas com sistemas de criptografia (Stavroulakis, 2007).

De acordo com a recomendação ITU-R M 2.014/1998, o grande diferencial de um sistema de rádio troncalizado está centrado na possibilidade de implementação de seus diversos tele-serviços, técnicas de modulação e criptografia, bem como a sua eficiência na gestão dos recursos de infraestrutura e, especialmente, do espectro eletromagnético disponível. Essas são condicionantes *sine qua non* para instalação eficiente de uma rede de rádio troncalizada.

Além disso, segundo Ketterling (2004), Redl (1998) e Stavroulakis (2007), os sistemas de rádio digital troncalizados devem possuir recursos integradores para seus usuários, como possibilitar a formação de grupos de chamadas entre as estações móveis; centrais de atendimento e despacho; autenticação, capacidade e tráfego diferenciados; bem como cobertura e plano de frequência dedicados e exclusivos.

Trata-se de uma necessidade emergente, que já na transição dos anos 80 e 90 mostrava-se latente. Essa lacuna tecnológica se fez presente porque os padrões de telefonia móvel existentes naquele período não eram compatíveis com as demandas dos serviços de telecomunicações existentes e os padrões de rádio troncalizado vigentes não atendiam as exigências por segurança e privacidade das comunicações. De acordo com Ketterling (2004), Redl (1998) e Stavroulakis (2007), ainda hoje, esses parâmetros não são contemplados pelas redes de telefonia móvel contemporâneas.

Assim, no início dos anos 90, empresas e organismos de pesquisa de tecnologia em Rádio Móvel Profissional (PMR – sigla em inglês) se associaram para desenvolver um padrão aberto de rádio troncalizado com modulação digital.

Esse grupo de empresas e institutos de pesquisa desejava criar um padrão de rádio digital troncalizado com o intuito de se transformar em uma tecnologia de Rádio Móvel de Acesso Público (PAMR – sigla em inglês), isto é, que atendesse os requisitos de uma tecnologia PMR e, ao mesmo tempo, estivesse disponível para todas as empresas interessadas em fabricar e comercializar (Stavroulakis, 2007).

Esse padrão foi desenvolvido e foi denominado Rádio Troncalizado Terrestre (TETRA - *Terrestrial Trunked Radio*). Esse padrão passou a utilizar inovadoras técnicas de modulação digital, e ainda, considerando a possibilidade de integração com os sistemas convencionais PMR legados e redes de telefonia pública móvel e fixa comutada.

*“O mercado PMR é variado, compreendendo uma ampla faixa de usuários. O mercado total PMR e PAMR na Europa em 1996 compreende 4,5 milhões de terminais de rádio.” (Webb, 1999: 108)*

Nesse mercado destacam-se as empresas com frota de estações móveis (taxis, empresas de energia, gás e outras), construção civil, naval e companhias de petróleo. No entanto, a estratégia dos desenvolvedores do padrão era atingir o grande filão deste segmento de telecomunicações, que compreendia o nicho formado pelos militares e órgãos de segurança pública (Stavroulakis, 2007).

Em 1994, o padrão TETRA foi inicialmente idealizado para ser denominado de padrão de “*Rádio Troncalizado Trans-Europeu*”, uma vez que as empresas e institutos de pesquisa que desenvolveram a tecnologia eram, predominantemente, daquele continente. Entretanto, o TETRA foi oficialmente registrado no Instituto Europeu de Padronização em Telecomunicações (ETSI – sigla em inglês) com o nome de “*Rádio Troncalizado Terrestre*”, o qual disponibilizou para domínio público as especificações mínimas de cada interface de uma rede troncalizada TETRA.

A Figura 8, a seguir, apresenta uma listagem das especificações mais relevantes do padrão, a logomarca do padrão e do respectivo organismo de padronização:

<p><b>TETRA Voice Plus Data ETS 300 392</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Part 1 General network design</li> <li>Part 2 Air Interface</li> <li>Part 3 Inter-working</li> <li>Part 4 Gateways</li> <li>Part 5 Terminal equipment interface</li> <li>Part 6 Line connected stations</li> <li>Part 7 Security</li> <li>Part 8 Network management services</li> <li>Part 9 Performance objectives</li> <li>Part 10 Supplementary services stage 1</li> <li>Part 11 Supplementary services stage 2</li> <li>Part 12 Supplementary services stage 3</li> <li>Part 13 SDL model for air interface</li> <li>Part 14 PICS Proforma</li> <li>Part 15 Interworking - extended operations</li> <li>Part 16 Gateways for supplementary services</li> </ul>	<p><b>TETRA Conformance Test ETS 300 394</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Part 1 Radio conformance testing</li> <li>Part 2 Protocol conformance testing - voice + data</li> </ul>
<p><b>TETRA Packet Data Optimised ETS 300 393</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Part 1 General network design</li> <li>Part 2 Air Interface</li> <li>Part 3 Inter-working</li> <li>Part 4 Gateways</li> <li>Part 5 Terminal equipment interface</li> <li>Part 6 Line connected stations</li> <li>Part 7 Security</li> <li>Part 8 Network management services</li> <li>Part 9 Performance objectives</li> <li>Part 10 SDL model for air interface</li> <li>Part 11 PICS Proforma</li> </ul>	<p><b>TETRA Codec ETS 300 395</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Part 1 General description of speech functions</li> <li>Part 2 Codec</li> <li>Part 3 Specific operational features</li> <li>Part 4 Codec conformance testing</li> </ul>
	<p><b>TETRA Direct Mode ETS 300 396</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Part 1 General network design</li> <li>Part 2 Direct MS - MS air interface - radio aspects</li> <li>Part 3 Repeater</li> <li>Part 4 Gateway</li> <li>Part 5 Security</li> </ul>
	 

**Figura 8 – Lista de Especificações do Padrão TETRA**

Fonte: Adaptado de ETSI, 2010.

Além disso, as grandes empresas de tecnologia também fundaram, em 1994, uma associação, por meio do documento denominado “*Memorando de Entendimento TETRA*” (Tetra MoU – sigla em inglês).

Essa associação ampliou a comercialização do padrão em âmbito mundial, bem como sedimentou a divulgação das especificações no mercado PMR por meio da certificação de produtos compatíveis com a tecnologia:

The screenshot displays the homepage of the TETRA Association website. At the top, the browser window shows the URL <http://www.tetramou.com/>. The website header includes the TETRA logo and the tagline "CRITICAL COMMUNICATIONS for all professional users". A search bar is positioned below the header. The main content area is divided into several sections: a large banner for "TETRA for public safety" featuring a firefighter; a "World Events" section listing events like "Professional Mobile Telecomms Day" and "TETRA for Turkey"; a "Latest News" section with articles such as "TETRA in the US workshop" and "Public Safety mobile broadband and spectrum needs"; a "TETRA Networks" section mentioning "117 countries of the world"; and a "TETRA News" section with a "TETRA NEWS Issue 1/2010" download link. A navigation menu on the left includes links for "About TETRA", "Why TETRA", "Case Studies", "TETRA Association", "Why & how to join", "The Members", "Interoperability", and "World Events". At the bottom, there are "Contact Us" and "Members Area" buttons. The browser status bar at the very bottom indicates "1 item(ns) restante(s) Aguardando http://www.tetramou.cc" and "Internet | Modo Protegido: Ativado".

**Figura 9 – Página da Associação TETRAMoU**

Fonte: <http://www.tetramou.com/>

Nesse contexto, de acordo com Ketterling (2004), Stavroulakis (2007) e Webb (1999), o padrão TETRA se destaca por permitir ao segmento PMR a interoperabilidade de suas redes. Nessa análise, a interoperabilidade é o seu diferencial mais importante, especialmente para os empreendimentos que buscam a integração e compatibilidade com outras redes, especialmente nos segmentos voltados para o uso militar e segurança pública.

Nos momentos de crise, tal como em atentados terroristas ou eventos que mobilizam um contingente elevado de pessoas, exigem comunicações integradas dos órgãos de segurança. Nessas ocasiões é recomendável que os serviços de emergência policial, médico, incêndio, defesa civil, entre outros, se comuniquem

diretamente com o serviço de coordenação e controle de gerenciamento da crise (Manner, 2003).

Segundo o SAFECOM (2006), Morris (2004) e Stavroulakis (2007), para que isso ocorra, é recomendável que os projetos dessas redes de radiocomunicação contemplem o maior grau de interoperabilidade possível:

**TABELA 1 – NÍVEIS DE INTEROPERABILIDADE**

Nível	Característica Técnica
1	Nenhuma comunicação entre redes, os terminais não instalados de acordo com a tecnologia
2	Comunicação em modo direto apenas entre os terminais
3	Canais de radiofrequências comuns, mas com características diferentes das redes de origem
4	Estações Base integradas por consoles de despacho (4-fios - TX/RX)
5	Operação em modo “visitante” (ROAMING) com serviços parcialmente disponibilizados
6	Plena compatibilidade de gerenciamento e operação

Fonte: Adaptado de “Declaração de requisitos para interoperabilidade e comunicações sem-fio de Segurança Pública”, SAFECOM, 2006.

O compartilhamento de redes de telecomunicações no padrão TETRA está associado com interoperabilidade que, genericamente está relacionada com a capacidade de operação mútua, comum, integrada, de equipamentos de diferentes fornecedores dessa tecnologia (Ketterling, 2004)

Na rede TETRA isso é possível porque, conforme descrito por Ketterling (2004), Stavroulakis (2007) e Webb (1999), o padrão possibilita o acesso, por diferentes empresas de tecnologia, de suas especificações técnicas mínimas para cada interface ou subsistema da rede de comunicação troncalizada.

Para tanto, basta a empresa de telecomunicações contatar a ETSI e solicitar o documento técnico descritivo para subsidiar seu projeto industrial que poderá ser submetido à certificação do TETRAMoU. A Figura 10 apresenta uma simulação de busca para aquisição do documento técnico referente ao projeto da rede TETRA:

The screenshot shows the ETSI Publications Download Area search results page. The page title is "ETSI Publications Download Area" and the version is 3.4. The search results are displayed in a table format. The table has columns for document title, reference, source, size, and former price code. Each row includes a "Download" button and a "Latest document information" link.

Document Title	Reference	Source	Size	Former Price Code
ETSI EN 300 392-1 V1.4.1 (2009-01)	REN/TETRA-03190	TETRA3	981787 bytes (180 Pages)	P
Draft ETSI EN 300 392-2 V3.4.0 (2010-03)	REN/TETRA-03182	TETRA3	8071891 bytes (1284 Pages)	P1200
ETSI EN 300 392-2 V2.5.2 (2005-11)	REN/TETRA-03129	TETRA3	5269273 bytes (898 Pages)	P800
Draft ETSI EN 300 392-3-1 V1.3.0 (2010-04)	REN/TETRA-03192	TETRA3	385862 bytes (54 Pages)	J
Draft ETSI EN 300 392-3-2 V1.4.0 (2010-04)	REN/TETRA-03193	TETRA3	905273 bytes (139 Pages)	O
ETSI EN 300 392-3-3 V1.2.1 (2004-01)	REN/TETRA-03087	TETRA3	1311866 bytes (248 Pages)	S

**Figura 10 – Busca de Documento Técnico TETRA no Sítio da ETSI**  
**Fonte: <http://pda.etsi.org/pda/AQuery.asp>**

O padrão TETRA é adotado tanto na Europa quanto em outras partes do mundo, pois diferentes empresas de telecomunicações fabricam e comercializam equipamentos para diferentes mercados PMR/PAMR, desde o segmento militar até aplicações civis convencionais (Stavroulakis, 2007).

Em alguns desses segmentos, a demanda por tecnologia dedicada e exclusiva é tão grande que se denominou a esse grupo de usuários como Rádio Móvel Especializado (SMR – sigla em inglês). A Figura 11, a seguir, apresenta um equipamento TETRA utilizado em uma simulação de crise pelo exército alemão em 2003:



**(a) Localização do Transceptor Móvel em Veículo Militar**

**(b) Detalhe do Transceptor**

**Figura 11 – Equipamento TETRA pelo Exército Alemão**

Fonte: [www.tetramou.com](http://www.tetramou.com)

As redes TETRA chegaram ao Brasil no final dos anos 90, no entanto, apenas em 2007 uma rede de grandes proporções foi implantada. Essa rede surgiu para atender a demanda por segurança nas comunicações oficiais no Rio

de Janeiro, o qual optou pelo padrão TETRA para apoiar as comunicações na 15ª edição dos jogos Pan-Americanos na capital carioca (ANATEL, 2007).

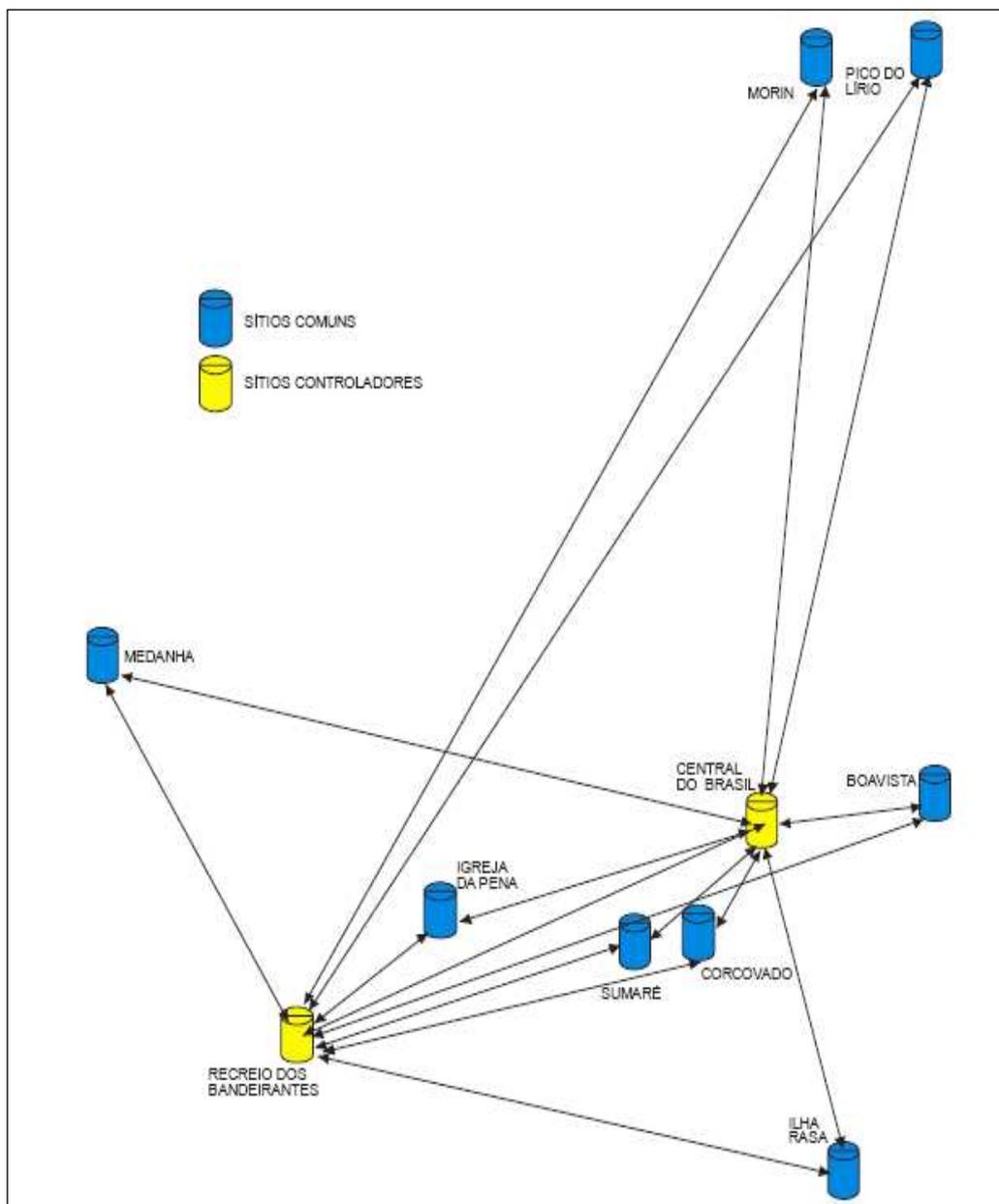


**(a) Localização do Transceptor Móvel em Veículo Policial**

**(b) Detalhe das Estações Base**

**Figura 12 – Equipamentos TETRA dos Jogos Pan-Americanos de 2007**  
Fonte: Genro, 2007.

Durante esse evento, cerca de 15.000 estações de rádio TETRA estiveram em funcionamento para cobrir as áreas da cidade que teriam atividades relacionadas com os jogos Pan-Americanos. A Figura 13, a seguir, apresenta um diagrama de ligação da rede TETRA utilizada, onde existem 2 sítios controladores (amarelo) e 8 sítios secundários (azul), com o número de canais variando entre 16 a 28, interligados com enlaces de micro-ondas de 2 Mbits, para suprir cerca de 1.500 estações móveis por sítio:



**Figura 13 – Diagrama de Ligação da Rede dos Jogos Pan-Americanos de 2007**  
 Fonte: [www.mj.gov/institucional/licitacao](http://www.mj.gov/institucional/licitacao)

Pouco tempo depois, em 2008, esse padrão também foi selecionado pelo governo chinês para subsidiar a rede de comunicações de segurança na 24ª edição dos jogos olímpicos, em Beijing (RRMAG, 2008).

Atualmente o padrão TETRA se consolida nos mercados PMR/SMR por adotar especificações técnicas públicas (PAMR) e uma política aberta de

desenvolvimento tecnológico. Além disso, tem sido a opção mais adequada nas operações de intervenção de segurança pública e aplicação militar em ambientes urbanos nos momentos de crise (Ferreira&Grassi, 2008).

## **2.2 Interface Aérea e Gestão do Espectro**

Para Ketterling (2004), Stavroulakis (2007) e Webb (1999), a análise do padrão TETRA deve ser iniciada a partir do entendimento das suas interfaces aéreas. Dessa maneira, segundo esses autores, é possível fazer a gestão do espectro eletromagnético considerando as redes adjacentes e o reuso de frequências. Em seguida, a análise do projeto, enfatizando a camada física e lógica da tecnologia.

### **2.2.1 Interface Aérea**

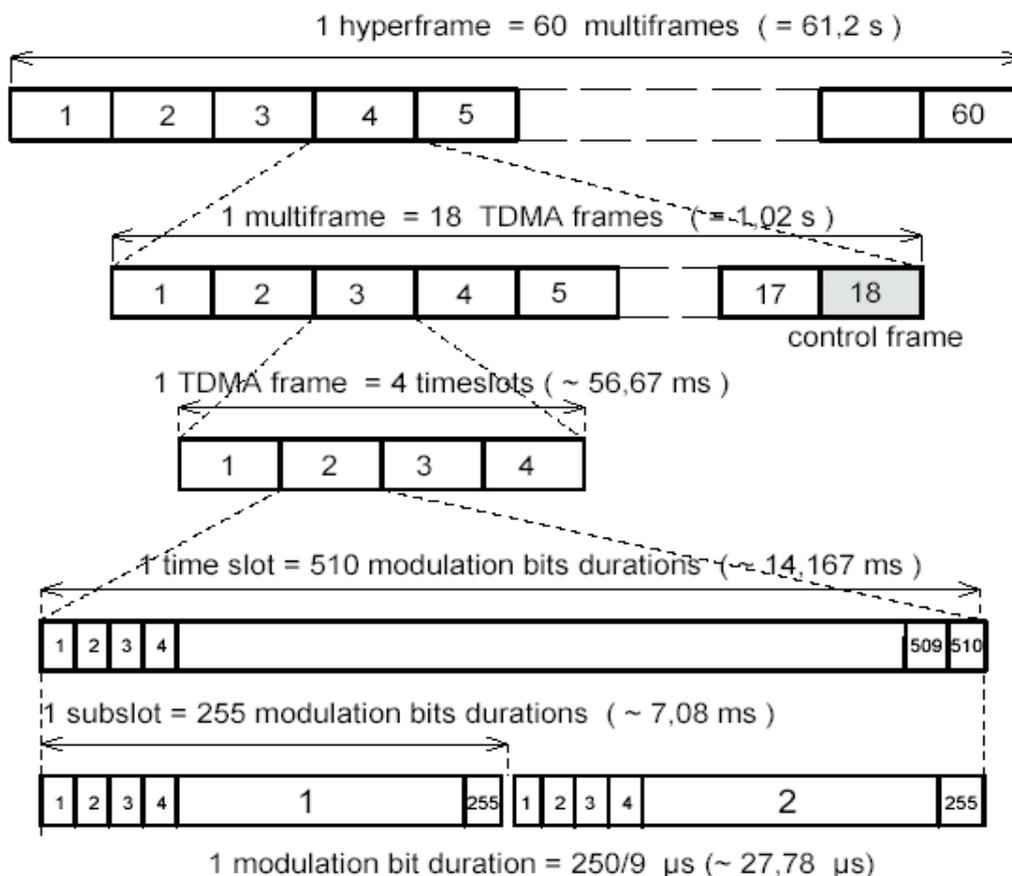
Nessa discussão, de acordo com esses autores, o padrão TETRA apresenta-se compatível para funcionamento compartilhado nas faixas de radiofrequências destinadas aos sistemas PMR convencionais analógicos e digitais. Essa compatibilidade se faz presente em seus três modos de operação com as suas respectivas *interfaces* aéreas: *a) Modo de Operação Direto (DMO); b) Modo de Operação Troncalizado (TMO); c) Voz e Dados (V+D).*

A opção de operação em diferentes modos apresenta-se como uma característica importante, uma vez que considera a possibilidade de operação integrada com as redes existentes em VHF e UHF, e ainda, com a telefonia móvel. Essas informações possuem descrição e registro detalhado na ETSI, facilitando a sua interpretação no momento de seu dimensionamento em projeto (Ketterling, 2004).

Essa não é uma característica simples, uma vez que outras tecnologias, entre essas aquelas que utilizam espalhamento espectral e/ou salto de frequência, dependem da alocação especial no espectro para seu funcionamento sem efeitos colaterais nas redes adjacentes. Trata-se de uma medida cautelar que evita transtornos às redes secundárias devido às interferências e batimentos em frequência. No entanto, segundo Ketterling (2004), esse problema não ocorre nas redes que utilizam o padrão TETRA, o qual utiliza técnica de acesso múltiplo das estações por divisão do tempo (TDMA).

De acordo com a recomendação da ETSI EN 300.392-2, v.2.5.2, de novembro de 2005, entre outras, a *interface* aérea do TETRA utiliza técnica de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA) em canais com largura de até de 25kHz. Nesse canal são alocadas até quatro portadoras de estações fixas e/ou móveis em instantes de tempo determinados, sendo que o canal é alocado de maneira dinâmica e composto de uma frequência para transmissão e outra para recepção.

As janelas de tempo das portadoras possuem um período de 14,167ms para transmissão dos dados com taxa de modulação de até 36kbit/s. Para tanto, é adotado o esquema de modulação  $\pi/4$  *Shifted Differential Quaternary Phase Shift Keying* ( $\pi/4$  – DQPSK). São modulados 255 bits em sub-quadros com duração de aproximadamente 7,08ms. Dois sub-quadros compõe um quadro TDMA/TETRA com duração de 14,167ms, os quais são agrupados em 18 quadros para formar um multi-quadro de 1,02s. Por fim, é formatado um hiper-quadro de 61,2s com a seqüência de 60 multi-quadros. A Figura 14 ilustra o processo de formatação dos quadros de dados TETRA que são enviados pela *interface* aérea V+D:



**Figura 14 – Formatação dos Quadros de Voz + Dados TDMA/TETRA**  
 Fonte: ETSI EN 300.392-2, v.2.5.2/2005

Para a operação em modo direto, isto é DMO, essa configuração não é válida, uma vez que o canal de comunicação de 25 kHz pode ser totalmente ocupado para a conversação rádio-a-rádio com modulação digital sem TDMA. A estação pode passar operar como um canal *half-duplex* convencional se houver necessidade. Esse processo não é utilizado com freqüência, uma vez que mesmo em modo DMO as estações podem ocupar o canal compartilhado no tempo entre quatro lacunas nas janelas de tempo TETRA (Ketterling, 2004).

Outro aspecto relevante está relacionado com a comunicação de “Voz+Dados” ou, simplesmente, “V+D”. Nesse processo, se houver necessidade, o intervalo destinado às outras estações na janela de tempo, pode ser reservado exclusivamente à estação que está enviando ou recebendo dados, de acordo com o tamanho do arquivo digital que deve ser encaminhado na rede. As outras estações são redirecionadas para outros canais, compartilhando intervalos determinados nas janelas de tempo alocadas dinamicamente (Ketterling, 2004).

Assim, a primeira vista, o padrão TETRA utiliza um canal de 25kHz, ou seja, com largura ampliada se comparado aos seus concorrentes. Por exemplo, de acordo com Harte (2004), Redl (1998), Ketterling (2004) e Stavroulakis (2007), os padrões APCO 25 e TETRAPOL podem utilizar largura de canal de 10 a 12,5kHz, ou seja, menos da metade do espectro utilizado pelo canal no padrão TETRA.

No entanto, para Ketterling (2004) e Stavroulakis (2007) trata-se de uma comparação frágil, uma vez que um canal TETRA comporta nos 25 kHz do canal quatro estações da rede, o que representa uma utilização de 6,25kHz para cada estação durante a conversação. Portanto, nessa perspectiva, o padrão TETRA seria mais eficiente para gerenciamento do espectro que os demais concorrentes.

No entanto, ressalta-se que a divisão do canal entre as quatro estações não é feita no espectro, mas no tempo. Portanto, durante um intervalo específico na janela de tempo destinada a uma determinada estação, ela ocupa totalmente os 25kHz do canal.

Ainda assim, de acordo com o Comitê Europeu de Radiocomunicações – CER (1998), essas características devem ser ponderadas de acordo com a topologia da rede adotada, considerando, entre outras variáveis, a possibilidade de tráfego de voz e dados, modo de operação direto, tamanho das células, bem como a operação *full-duplex* nas conexões com a rede de telefonia pública móvel e fixa comutada – Modo de Rádio Troncalizado TETRA (TMO).

Dessa maneira, com essas informações, de acordo com o Comitê Europeu de Radiocomunicações (1998), é possível classificar os padrões de rádio troncalizado analógico e digital conforme a sua eficiência espectral, isto é, capacidade de utilizar de modo eficiente e eficaz o espectro eletromagnético. Essa classificação pode auxiliar o engenheiro projetista na definição do padrão e da topologia de rede adequada em um projeto de radiocomunicação. Para tanto, essas informações apresentam-se consolidadas na Tabela 2 a seguir:

**TABELA 2 – CLASSIFICAÇÃO DE EFICIÊNCIA ESPECTRAL DOS PADRÕES DE RÁDIO DIGITAL EXISTENTES NO MERCADO MUNDIAL**

<b>Padrão de Rádio Digital</b>	<b>Células por Largura de Banda (N/Hz)</b>	<b>Eficiência em Modo Digital com Ruído (bits/Hz)</b>	<b>Eficiência em Modo Digital com Interferência ([bits/s]/[Hz.Cel])</b>	<b>Categoria de Eficiência Espectral CRE/98</b>
APCO-25 6,5kHz	80	0,384	0,053	B
APCO-25 12,5kHz	40	0,288	0,070	C
TETRAPOL 10kHz	50	0,240	0,053	C
TETRAPOL 12,5kHz	40	0,192	0,043	C
TETRA 25kHz V+D	80	0,384	0,050	C
TETRA 25kHz DMO	40	0,192	0,025	B

Fonte: Adaptado do Relatório 52, CRE - 1998

Nessa classificação, a CRE utilizou diferentes critérios para emitir uma classificação hierarquizada acerca dos padrões de rádio digital mais utilizados no mundo. Os padrões que alcançaram a maior classificação, isto é “A”, não são comercializados em larga escala porque, na época, encontravam-se em experimentação ou não possuíam modulação digital. Esse é o caso do MPT-1327, que obteve classificação “A”, no entanto, não atende todos os requisitos de técnicas de modulação digital.

Além disso, entre esses critérios, a CRE destacou a relação entre a utilização do espectro eletromagnético e o número de células utilizadas para cobertura em diferentes cenários. Os dois cenários relevantes nesse estudo foram a operação com ruído e/ou interferência co-canal. Além disso, também foram avaliados os padrões em diferentes modos de configuração.

Mesmo com essas ressalvas, nesse estudo, verifica-se que o padrão TETRA na configuração de “Voz + Dados”, isto é, no cenário mais crítico possível, possui eficiência espectral compatível com os demais padrões de rádio digital existentes. Entretanto, o padrão TETRA pode comportar um número maior de estações quando estiver operando apenas no modo de comunicação de voz ou direto entre as estações (DMO).

Isso é possível, uma vez que a comunicação entre as estações pode não ser exclusivamente de dados, característica relevante nas redes PMR. Portanto, nessa análise, o congestionamento da rede e seu bloqueio por excesso de tráfego devem ser analisados sobre diferentes perspectivas (Ketterling, 2004).

Para Alotaibi & Ali (2006) e Ketterling (2004) essa eficiência torna-se mais notória em ambientes urbanos, quando outros fatores são considerados nos cálculos de predição de um projeto com a rede TETRA. Entre essas variáveis, esses autores destacam o desvanecimento por multipercurso e efeito doppler.

Em 2008, esses requisitos também foram avaliados pela Agência Nacional de Administração de Telecomunicações e Informação norte-americana (NTIA – sigla em inglês) que atribuiu às técnicas de modulação digital a garantia da gestão e coordenação do espectro de modo eficiente. Embora o TETRA não esteja tão difundido nos Estados Unidos, a gestão eficiente do espectro tem despertado o interesse dos institutos de pesquisa estadunidenses, entre esses, a Universidade do Colorado:

*“Quando ambas as normas foram julgadas tecnicamente contra cada critério, verificou-se que o TETRA possui desempenho equivalente, se não superior, quando comparado com APCO-25 e, portanto, pode ser implantado em nos estados Unidos.” (Alfayez&Hatfield, 2009: 26-27)*

Nessa análise verifica-se que o padrão TETRA tem-se destacado no segmento PMR por diferentes motivos, entre esses, a sua interface aérea, a qual permite uma gestão eficiente do espectro. Essa garantia está presente, entre outros aspectos, no acesso múltiplo das estações por divisão de tempo nos canais disponíveis para comunicação.

### 2.2.2 Gestão do Espectro

Para a gestão e coordenação do espectro, as faixas destinadas à operação da rede TETRA são definidas pelas organizações nacionais de telecomunicações de cada país, no entanto, essas organizações adotam, geralmente, as recomendações do TETRAMoU. Para tanto, as aplicações civis são alocadas nas faixas de 385 a 395 MHz e, para aplicações militares e de segurança pública, de 380 a 385 MHz.

Essas definições são importantes diretrizes para elaboração dos projetos industriais dos fabricantes de equipamentos TETRA. De posse dessas informações, as empresas direcionam suas linhas de montagem e os engenheiros de telecomunicações conseguem desenvolver e executar os projetos com rede de rádio TETRA.

No Brasil não é diferente, pois a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), por meio da Resolução 435, de 25 de maio de 2006, alocou 28 canais *duplex* para segurança pública no país, atribuindo as faixas de 381,0500 a 381,7250 MHz e 391,0500 a 391,7250 MHz ao TETRA. No referido documento são estipulados os valores de potência máxima de 250W e 25W para estações base e móvel respectivamente.

Além disso, a operação de uma rede TETRA é considerada pela agência reguladora brasileira como execução de um Serviço Limitado Móvel Privativo (SLMP), e por isso, como qualquer outro SLMP, também segue a regulamentação específica para execução dessa modalidade de atividade de telecomunicações. Isso implica dizer que, entre outras atribuições, se faz necessário o pagamento

dos impostos e taxas vigentes para o SLMP, excetuando-se os órgãos de segurança pública, os quais são isentos de alguns desses tributos pela Lei Geral de Telecomunicações.

Portanto, nessa discussão, verifica-se que o padrão TETRA apresenta uma interface aérea robusta e eficiente, capaz de atender os requisitos mais rígidos para gestão do espectro. Para tanto, o padrão utiliza técnica de acesso TDMA em canais de 25kHz para conversação de quatro estações da rede. Além disso, esse canal pode ser totalmente dedicado a uma única estação se houver a necessidade para a transmissão de dados ou operação em modo direto.

### **2.3 Modulação e Criptografia**

De acordo com Ketterling (2004) e Stavroulakis (2007) a discussão acerca do método de modulação e criptografia de uma rede TETRA tem como ponto de partida a compreensão do modelo de camadas do sistema de comunicação TETRA adaptado ao modelo de referência proposto pela Organização de Padronização Internacional (OSI – sigla em inglês). Dessa maneira, é possível avaliar, claramente, que cada um desses processos possui autonomia e isenção para garantir segurança e integridade das mensagens que trafegam na rede.

Nessa análise, os processos de modulação e demodulação estão alocados no nível mais inferior desse modelo de camadas, isto é, na camada física. A modulação garante o envio e o recebimento de todos os bits nessa rede. No entanto, ela não é capaz de corrigir erros, e ainda, garantir a sua integridade e confidencialidade. Esses processos ocorrem em camadas diferentes dessa rede de comunicação, os quais podem ser avaliados na Tabela 3 a seguir:

**TABELA 3 – DESCRIÇÃO DAS CAMADAS DA REDE TETRA**

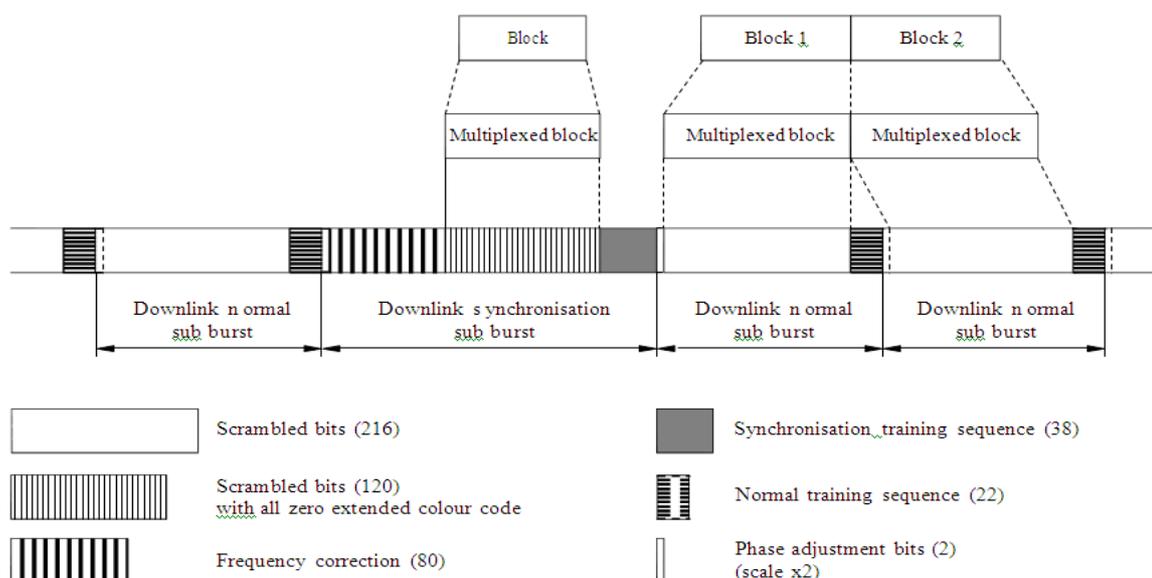
<b>Nível</b>	<b>Camada</b>	<b>Descrição</b>
7	Aplicação	Software de Usuário – Voz e Dados (e-mail, etc.)
6	Apresentação	Formatação da conversação e Encriptação
5	Sessão	Endereçamento da rede
4	Transporte	Controle da Transmissão (GoS, etc.)
3	Rede (Superior)	Gerenciamento de Mobilidade (Localização, registro, autenticação, etc.)
	Rede (Inferior	Controle de conexão (QoS, etc.)
2	Enlace (Controle do Enlace Lógico - LLC)	Controle do enlace ponto-a-ponto, ARQ, Alocação de Canal Lógico
	(Controle de Acesso Médio – MAC)	Controle de blocos, sincronismo, grupos e identificação da estação
1	Física	Modulação/Demodulação, roteamento de canais/freqüências

Fonte: Adaptado de Ketterling (2004) e Stavroulakis (2007)

A camada de Enlace processa os blocos de bits para modulação e é nessa camada que é feito o controle de sincronismo das janelas de tempo utilizadas para o envio na rede. Nessa camada os blocos são identificados com a informação referente à estação e seu respectivo grupo. Para a correção dos

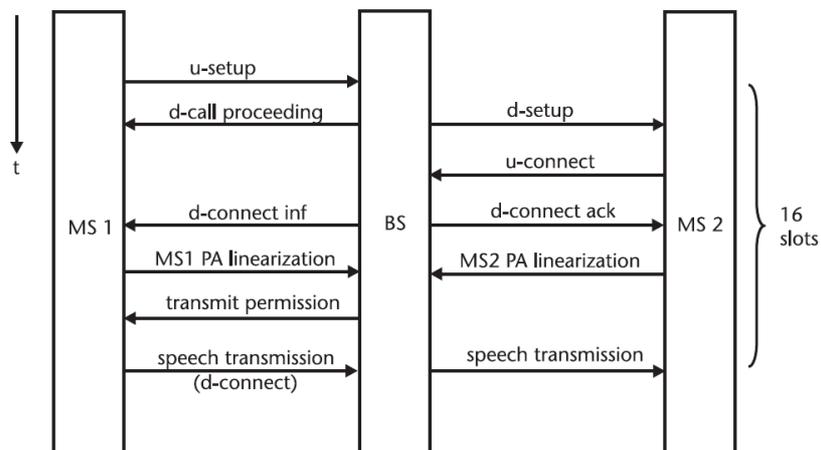
erros, é solicitada uma requisição na rede (ARQ), no intervalo de tempo alocado para a estação enviar ao seu destino específico.

A Figura 15, a seguir, apresenta a formação dos blocos de bits que são encaminhados para modulação em uma janela de tempo específica. O Controle Médio de Acesso (MAC) multiplexa e identifica os blocos enviados em um “burst”. Existem bits de alinhamento para sincronismo e é feito um mapeamento dos canais físicos e lógicos da rede. Os números de bits envolvidos nesse processo estão identificados entre os parênteses:



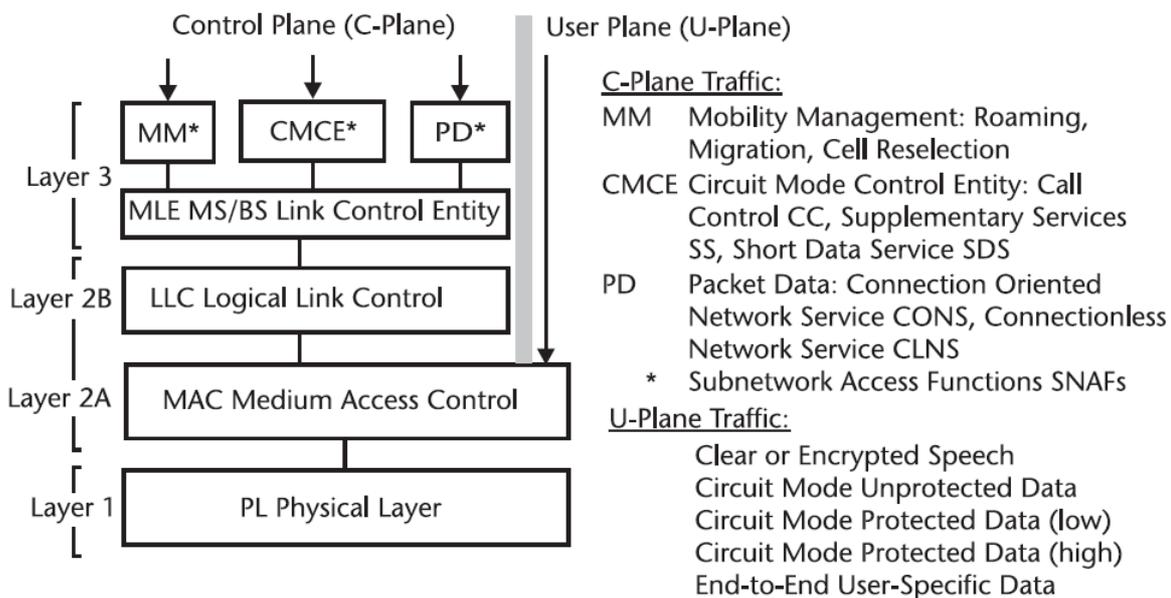
**Figura 15 – Formação dos Blocos Voz + Dados TDMA/TETRA**  
Fonte: Adaptado da ITU-M R. 2014

Esse processo é diferenciado para cada uma das *interfaces* aéreas do TETRA, as quais possuem parâmetros específicos definidos pela ETSI. Essas janelas de tempo são organizadas de maneira a obter a conexão da estação na rede. Esse processo é feito em 16 janelas de tempo, avaliadas na Figura 16 abaixo:



**Figura 16 – Processo de Chamada Individual TETRA V+D**  
**Fonte: Adaptado de Ketterling (2004)**

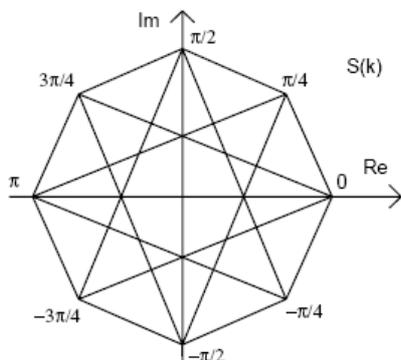
As demais camadas da rede estão presentes nesse processo para garantir o envio e recebimento correto dos blocos de bits. Para tanto, a Figura 17 apresenta os protocolos das camadas acima do nível físico da rede que processam o gerenciamento de mobilidade, o acesso e o tráfego dos pacotes de dados:



**Figura 17 – Protocolos de Comunicação da Rede TETRA V+D**  
 Fonte: Adaptado de Ketterling (2004)

### 2.3.1 Modulação

Após o entendimento acerca da estrutura da rede TETRA é possível inferir que a técnica de modulação a ser utilizada deve ser robusta e arrojada para garantir o envio dos blocos de bits pela interface aérea. De acordo com a recomendação ETSI EN 300 392-2/2005, o método adotado é o “ $\pi/4$  Chaveamento Diferencial por Quadratura e Fase” ( $\pi/4$ DQPSK). Nesse esquema os símbolos são modulados de acordo com uma matriz de referência para fase e amplitude do sinal que será enviado na *interface* aérea:



$B(2k-1)$	$B(2k)$	$D\phi(k)$
1	1	$-3\pi/4$
0	1	$+3\pi/4$
0	0	$+\pi/4$
1	0	$-\pi/4$

(a) Constelação de Possibilidades de Amplitude e Fase

(b) Matriz de Transição de Fases

**Figura 18 – Método de Modulação  $\pi/4$ DQPSK**  
Fonte: EN 300 392-2/2005

Na Figura 18 (a) é apresentada a constelação de possibilidades de amplitude e fase do sinal modulado em  $\pi/4$ DQPSK. Por sua vez, diferentemente do QPSK, a modulação  $\pi/4$ DQPSK pode distinguir os símbolos modulados por uma diferença angular de  $\pi/4$ . Essa diferença é detectada pela transição de fase proposta na matriz de possibilidades observada na Figura 18 (b). Para cada bit modulado ("B") existe uma correlação de amplitude e fase.

Assim, modulação  $\pi/4$ DQPSK dos bits de cada janela de tempo no padrão TETRA ocorre em função da amplitude e fase da portadora em para cada estado lógico de um símbolo. A mudança de fase está descrita na Figura 18 (b) e, acordo com a ETSI EN 300 392-2/2005, o sinal modulado por se interpretado como:

$$S(k) = S(k - 1) \exp(jD\phi(k)) \quad (1)$$

$$S(0) = 1$$

Onde:

S (K) = Símbolo Modulado

D $\phi$  - Mudança de fase

K – Número do Símbolo

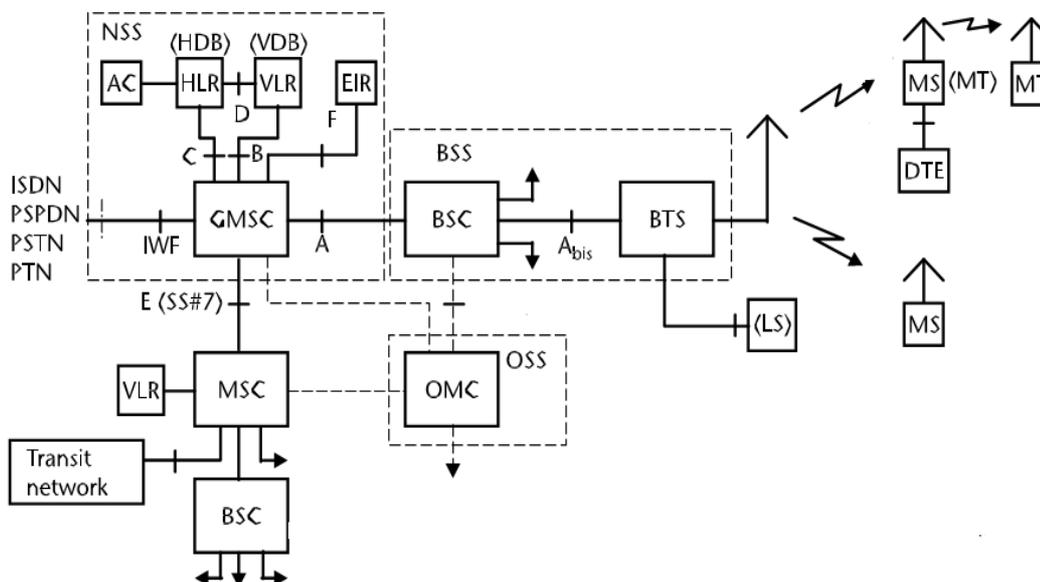
Segundo Chennakeshu & Saulnier (1993) a modulação  $\pi/4$ DQPSK é uma técnica arrojada, indicada para comunicações móveis em ambientes críticos. Trata-se de um método que pode ser entendido com a superposição de duas constelações QPSK singelas. A modulação por “*Chaveamento de Quadratura e Fase*” (QPSK – sigla em inglês) é uma técnica de modulação que utiliza parâmetros de fase e quadratura da onda portadora para modular a informação. Esses dois parâmetros permitem a transmissão de mais bits por símbolo que o PSK simples.

Para Chennakeshu & Saulnier (1993) a modulação  $\pi/4$ DQPSK permite a implementação de um detector simples, e ainda, proteção contra o desvanecimento no canal Rayleigh. Outro aspecto relevante, refere-se a sua *performance* perante ao efeito Doppler, uma característica muito perversa nas comunicações móveis.

### 2.3.2 Criptografia

Para Ketterling (2004) e Stavroulakis (2007), o padrão TETRA possui um importante diferencial para gerenciar a segurança de sua rede através do re-chaveamento da encriptação pela própria interface aérea. Esse processo é conhecido como “*Over-The-Air Rekeying*” (OTAR) e garante a troca das chaves de criptografia pela interface aérea.

Apesar disso, a topologia da rede TETRA é muito semelhante a uma rede de telefonia do Sistema Global para Comunicação Móvel (GSM – sigla em inglês). Para tanto, a Figura 19 apresenta esse diagrama de rede TETRA:



**Figura 19 – Diagrama de Ligação da Rede TETRA V+D**  
 Fonte: Adaptado de Ketterling (2004)

Nesse diagrama verifica-se que as estações móveis acessam a rede de acordo com o roteamento estabelecido pelo Centro de Roteamento dos Móveis (MSC – sigla em inglês). Ele possui os algoritmos necessários para gerenciar o acesso, por célula, de cada estação móvel (MS – sigla em inglês) na rede. O MSC integra o Subsistema de Roteamento e Rede (NSS – sigla em inglês).

A rede TETRA também possibilita o acesso direto na estação base por meio de uma Estação de Linha (LS – sigla em inglês). No ambiente de segurança pública, esse é mais um recurso relevante, uma vez que as centrais de despacho podem ter acesso prioritário à rede com essa facilidade tecnológica (Ketterling, 2004).

Para as estações móveis, esse acesso é feito por meio de um Subsistema de Estações Base (BSS – sigla em inglês) formado por um, ou mais, Controladores de Estações Base (BSC – sigla em inglês) que gerenciam as Estações Base Tranceptoras (BTS – sigla em inglês) que transmitem e recebem as portadoras moduladas em janelas de tempo específicas na *interface* aérea.

Ainda no NSS existe um Registro Local de Visitantes (VLR – sigla em inglês) para o controle das MS no domínio da MSC. Além disso, existem bancos de dados para verificação dessas, e outras, informações. Na Figura 19, ainda integram o NSS o Centro de Autenticação (AC – sigla em inglês), o Registro de Identificação de Equipamento (EIR – sigla em inglês) e o Registro Local Doméstico (HLR – sigla em inglês) que contém todas as informações das estações móveis do domínio do MSC.

Nessa rede, o AC processa a permissão para o acesso à rede e o EIR contém os dados de cada equipamento cadastrado nessa rede TETRA. É o EIR que possibilita o bloqueio de uma estação na rede TETRA (Ketterling, 2004).

Toda a estrutura do NSS é compartilhada por meio de uma *interface* conhecida como “*Gateway MSC*” ou simplesmente GMSC. O GMSC possibilita ainda o compartilhamento dessa infraestrutura com outras redes de comunicação, como as redes de telefonia fixa e/ou móvel.

Contudo, de acordo com Toikkanen (2007), a chave de autenticação da rede nunca é transmitida pela interface aérea, mas, dependendo do nível de encriptação, pode estar Estaticamente no Terminal Móvel (SCK – sigla em inglês), mudando Dinamicamente a Cada Autenticação (DCK – sigla em inglês), ou ainda, Comum (CCK – sigla em inglês) ou no Grupo de usuários (GCK – sigla em inglês).

Em cada um desses métodos, existem protocolos específicos de gerenciamento e autenticação para as estações móveis e a Infraestrutura de Gerenciamento e Roteamento (SwMI – sigla em inglês) da rede TETRA. Esses protocolos possuem algoritmos que seguem uma classificação de acordo com a relação entre as suas características e usuário:

**TABELA 4 – ALGORITMO DE ENCRIPÇÃO TETRA**

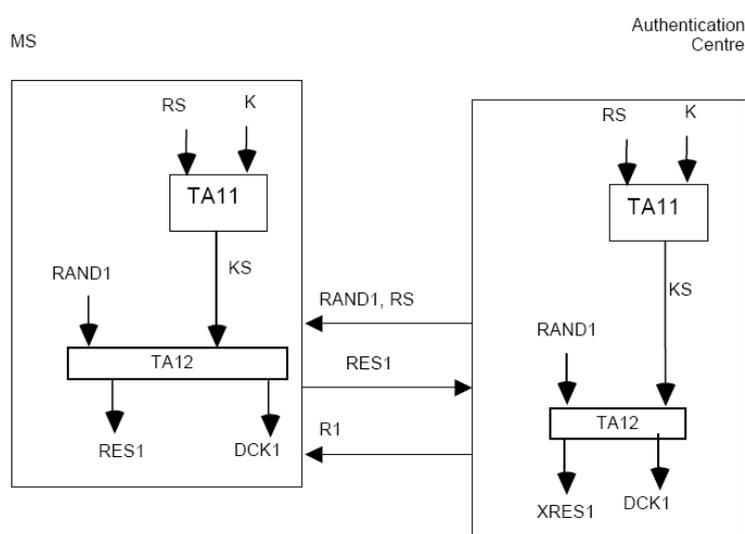
<b>Algoritmo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Público</b>
TAA1	Autenticação	Aberto

**CONTINUAÇÃO DA TABELA 4 – ALGORITMO DE ENCRIPTAÇÃO TETRA**

<b>Algoritmo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Público</b>
TEA1	Encriptação	Aberto
TEA2	Encriptação Segura	Polícia da Europa
TEA3	Encriptação Segura	Segurança Pública fora da Europa
TEA4	Encriptação Geral	Aberto

Fonte: Adaptado de Toikkanen (2007).

Em quase todos esses algoritmos é possível implementar a mudança da chave pela interface aérea (OTAR). Contudo, de acordo com Toikkanen (2007), essa chave não é encaminhada à estação móvel. Essa chave está alocada no *software* de gerenciamento da estação no próprio equipamento. A Figura 20 apresenta o ciclo de autenticação de uma estação móvel pela SwMI:



**Figura 20 – Autenticação da Estação Móvel na Rede TETRA V+D**  
 Fonte: Adaptado da EN 300 392/2005

Na Figura 20, existem dois algoritmos de autenticação (TA 11 e TA 12), que processam matematicamente uma Chave de Autenticação (KS). Inicialmente a SwMI envia um número aleatório (RAND1) e uma assinatura de referência (RS) para o móvel. A estação móvel processa a conta matemática com os algoritmos e a KS e envia o resultado (RES1) para a SwMI. A estrutura compara o resultado recebido com a sua resposta local (XRES1) ao RAND1 e RS. Caso o processo esteja correto, o móvel recebe a validação do resultado pelo R1 e será autenticado na rede.

Esse processo também pode ocorrer no sentido inverso, dependendo do modo de operação de cada estação na rede. Cada uma dessas etapas estão descritas, detalhadamente na ETSI 300.392-7/2010, a qual encontra-se disponível no site da ETSI para o público em geral. Por sua vez, a Figura 20 não apresenta o processo de mudança de chave pela interface aérea (OTAR), uma vez que envolve maior complexidade para visualização nesse tipo de diagrama.

Além disso, apesar da semelhança de processo de autenticação TETRA com o GSM, destaca-se que na telefonia celular não é possível utilizar a comunicação em modo direto rádio-a-rádio, bem o como OTAR.

Após a autenticação na rede, a estação móvel consegue realizar as chamadas nos modos V+D, DMO e TMO. O processo é semelhante ao GSM, mas os canais lógicos possuem designações distintas. Por exemplo, no Canal de Sinalização (SCH – sigla em inglês) trafegam informações de sinalização da rede. Também existe um Canal de Sincronismo de “*Broadcasting*” (BSCH – sigla em inglês), o qual é responsável pelo alinhamento das janelas de tempo em direção à estação móvel.

Para Manner (2003), as redes tecnológicas do segmento de comunicações críticas para serem consideradas seguras devem possuir, no mínimo, processos que garantam: *a) Autenticidade – reconhece a origem e o destino com segurança; b) Confidencialidade – dificulta severamente a interceptação; c) Integridade – garante o conteúdo da mensagem enviada e recebida.* Em função desses critérios, de acordo Toikkanen (2007) e Ketterling (2004) os processos de modulação e criptografia na rede TETRA garantem a segurança nessas redes.

Considerando essas particularidades, neste estudo, optou-se por aprofundar-se nessa discussão em detrimento de outras particularidades, uma vez que a proposta final envolve o desenvolvimento de uma rede de segurança para Belo Horizonte durante a Copa do Mundo de Futebol em 2014. Isto é, uma rede que deve privilegiar esses requisitos técnicos para garantir a segurança das mensagens que devem trafegar na rede durante o evento.

Portanto, existe ainda a possibilidade de estudos teóricos mais aprofundados sobre pontos específicos do padrão TETRA, entre esses, a análise individualizada de um protocolo de autenticação, ou ainda, do processo de troca de chaves de segurança pela *interface* aérea, entre outras abordagens técnicas e estratégicas.

## 2.4 Equipamentos TETRA

Grande parcela das empresas fornecedoras de equipamentos de telecomunicações no mercado global estão associadas ao TETRAMoU. Em função dessa característica, existe um considerável número de fabricantes de terminais e infraestrutura TETRA para diferentes segmentos PMR/PAMR. Logo, para melhor entendimento da tecnologia, é de fundamental importância o conhecimento acerca do funcionamento desses equipamentos para a sua escolha em projeto.

Ressalta-se ainda que, apesar da tecnologia possuir ampla divulgação entre os fabricantes associados, a ETSI recomenda parâmetros mínimos para interoperabilidade, no entanto, esses fornecedores possuem a liberdade de agregar funcionalidades “*extras*” aos seus produtos. Isso significa dizer que, o equipamento do fornecedor “*A*” possui compatibilidade com o equipamento do fornecedor “*B*”, contudo, se o usuário adquirir uma funcionalidade “*extra*” do fornecedor “*A*”, ela pode não ser compatível com o equipamento fornecido por “*B*” (Ketterling, 2004).

Dessa maneira, o engenheiro desenvolvedor PMR/PAMR deve conhecer os parâmetros mínimos de cada bloco da rede TETRA para não ser surpreendido por essas lacunas comerciais. Nesse sentido, alguns parâmetros básicos dos equipamentos da infraestrutura TETRA são discutidos a seguir:

### 2.4.1 Estação Base

De acordo com as recomendações da ETSI para o padrão TETRA, a estação base (BTS – sigla em inglês), juntamente com o SwMI, deve gerenciar o método de acesso TDMA das outras estações da rede, em canais distribuídos em setores específicos (células), com re-uso de frequências. Além disso, a célula de uma BTS-TETRA, de acordo com a ITU-R M.2014/1998 e Ketterling (2004), em áreas urbanas, está limitada a um raio de 3,8 km para obter uma cobertura satisfatória ao nível de móvel-portátil em toda a rede e, por esse motivo, necessita de algoritmos especiais esse controle.

Nessa análise preliminar, percebe-se que a BTS-TETRA possui características bastante particulares quando comparada com outras tecnologias PMR, entre essas, a sincronização das janelas de tempo para recepção e coordenação das emissões das estações móveis. Esse é um ponto de destaque, devido a sua complexidade, o qual é gerenciado pela BTS e SwNI. Para que isso seja possível, a BTS-TETRA fornece cinco canais lógicos de controle:

- i) Canal de Sincronismo de Emissão (BCCH – sigla em inglês);*
- ii) Canal de Alinhamento (LCH – sigla em inglês);*
- iii) Canal de Sinalização (SCH – sigla em inglês);*
- iv) Canal de Registro de Acesso (AACH – sigla em inglês);*
- v) Canal de Fuga de Tráfego (STCH – sigla em inglês).*

O BCCH é responsável por sincronizar os móveis e a rede como um todo, sendo esses o BSCH e o BNCH, respectivamente, os quais são exclusivos de

“*down-link*”. O LCH é composto de um canal de “*up-link*” compartilhado com os móveis (CLCH), e o outro, de “*down-link*”, compartilhado com as estações base (BLCH).

O canal de sinalização SCH possui três categorias: a) *Mensagens Completas – bidirecional – SCH/F*; b) *Mensagens Reduzidas – “down-link” – SCH/HD*; e c) *Mensagens Reduzidas – “up-link” – SCH/HU*. As mensagens que trafegam nesses canais controlam a gestão do tráfego na rede.

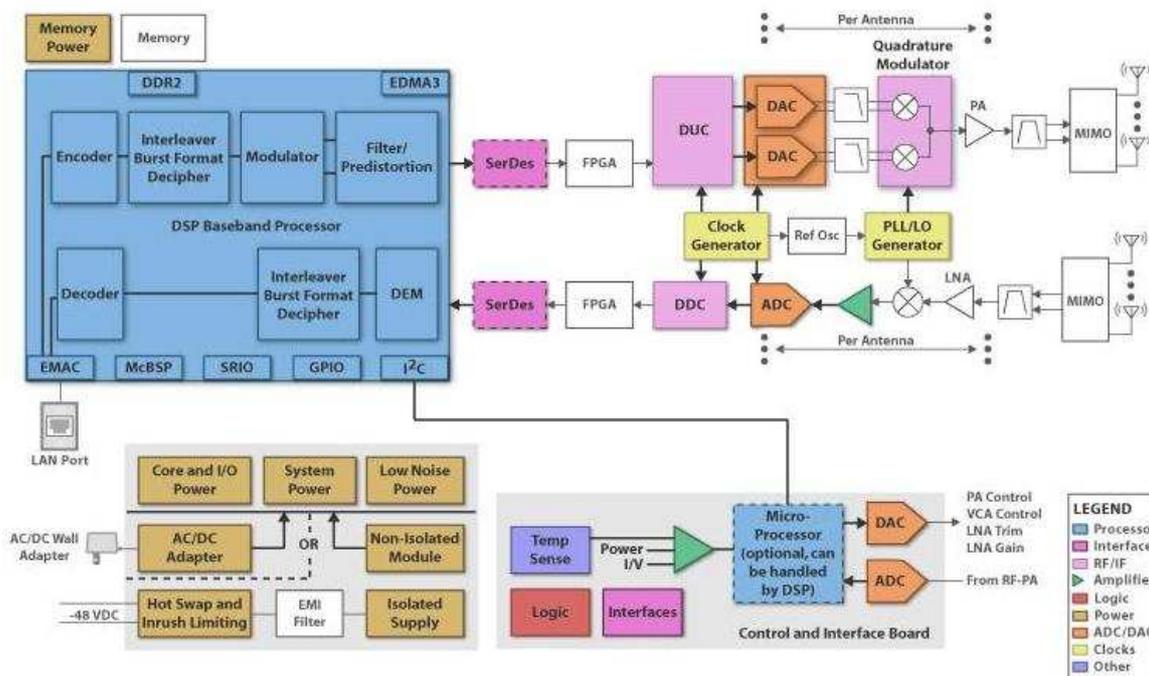
O AACH envia para os móveis a sinalização de disponibilidade da rede. Por sua vez, o STCH controla as prioridades de dados para vazão dos dados na rede.

Os canais físicos, isto é, aqueles disponibilizados pela interface aérea, são definidos em três categorias:

- i) *Canal de Controle Físico (CP – sigla em inglês)*;
- ii) *Canal Físico de Tráfego (TP – sigla em inglês)*;
- iii) *Canal Físico Não-Locado (UP – sigla em inglês)*.

O CP é subdividido em um canal principal e outro secundário, sendo esses o MCCH e SCCH, respectivamente, os quais determinam a portadora de RF a ser utilizada. O SCCH pode ser utilizado como extensão do MCCH.

O TP é o canal físico que transporta o canal lógico de tráfego (TCH). Por sua vez, o UP representa o canal livre para uma ou mais estações móveis. A Figura 21, a seguir, apresenta o diagrama em blocos de uma estação base TETRA:



**Figura 21 – Estação Base TETRA**  
 Fonte: Adaptado <http://focus.ti.com> – Texas Inc.

A análise da BTS-TETRA pela Figura 21 apresenta quatro blocos básicos:

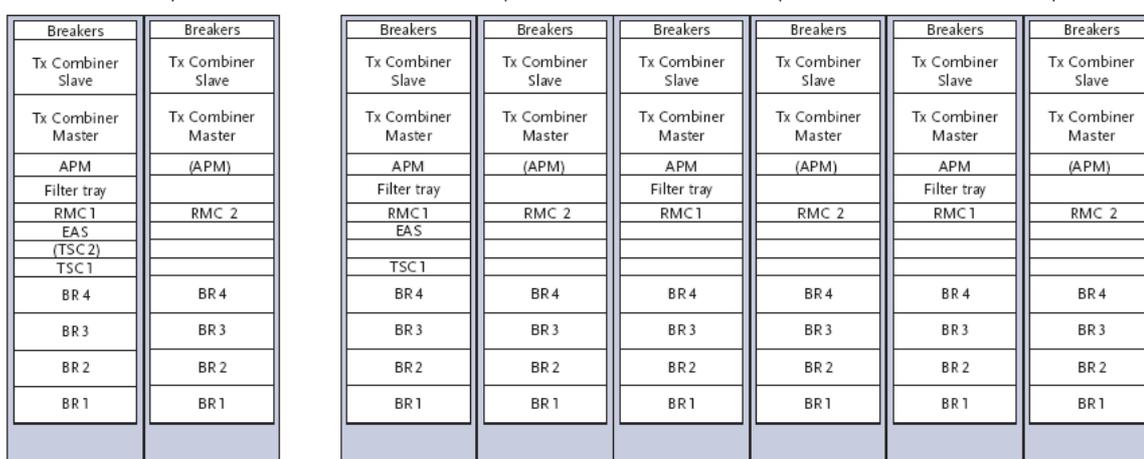
- Alimentação*;
- Placa de Interface e Controle*;
- Processador de Sinais Digitais*
- RF*.

O circuito de alimentação da BTS possui adaptadores de corrente contínua (-48VDC) e alternada (rede externa) com supressão de ruído e controle de corrente. A placa de controle e interface processa os elementos de monitoramento e sensores da BTS (temperatura, ganho, etc.) e envia as informações para o Processador de Sinais Digitais, que possui a interface de controle de roteamento e mobilidade pela porta Lan com a SwNI. Essa placa também envia e recebe os dados para a modulação e demodulação na placa de RF.

A placa de RF possui um relógio sincronizado, que gera o sinal de “clock” para oscilador de referência, o qual distribui em perfeita alocação de tempo, as

etapas de recepção e transmissão nas janelas de tempo especificadas pela BTS aos móveis. Tanto a transmissão quanto a recepção possuem módulos de quadratura (amplitude e fase) distintos para modulação e demodulação.

O sistema irradiante da BTS –TETRA pode ter uma topologia setorizada ou omnidirecional, dependendo do projeto em execução. Para tanto, a Figura 22 apresenta a disposição física dos equipamentos em *racks* nas duas topologias:



(a) Omnidirecional

(b) Setorizada

**Figura 22 – Disposição das Estações Base TETRA**

Fonte: Adaptado [www.motorola.com](http://www.motorola.com) – Motorola Inc.

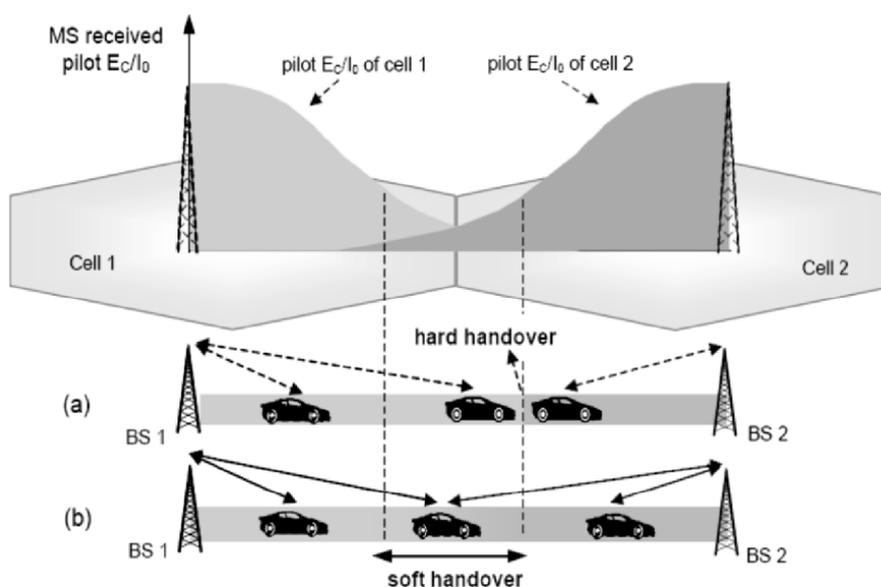
Tanto, na configuração omnidirecional, onde uma única antena irradia em todas as direções, quanto na setorizada, onde a célula é dividida em setores, os rádios base (BR – sigla em inglês) são “combinados” para acesso à interface aérea. Esses equipamentos são gerenciados pela Controladora do Site (TSC – sigla em inglês) que, além dessa tarefa, gerencia o ganho do módulo de potência (APM – sigla em inglês) e o filtro de recepção.

Em geral, a BTS-TETRA possui uma interface E1 para conexão com o centro de roteamento e mobilidade da rede TETRA. De acordo com os

parâmetros da rede, a BTS pode operar em até 10 níveis de potência. De acordo com a ETSI 300.392-2/2005, o menor nível corresponde a 28dBm (0,6W), e o maior, 46dBm (40W). A sua sensibilidade dinâmica sugerida é de -106dBm, no mínimo, para obter uma Taxa de Erro de Bit (BER – sigla em inglês) de 0,01%.

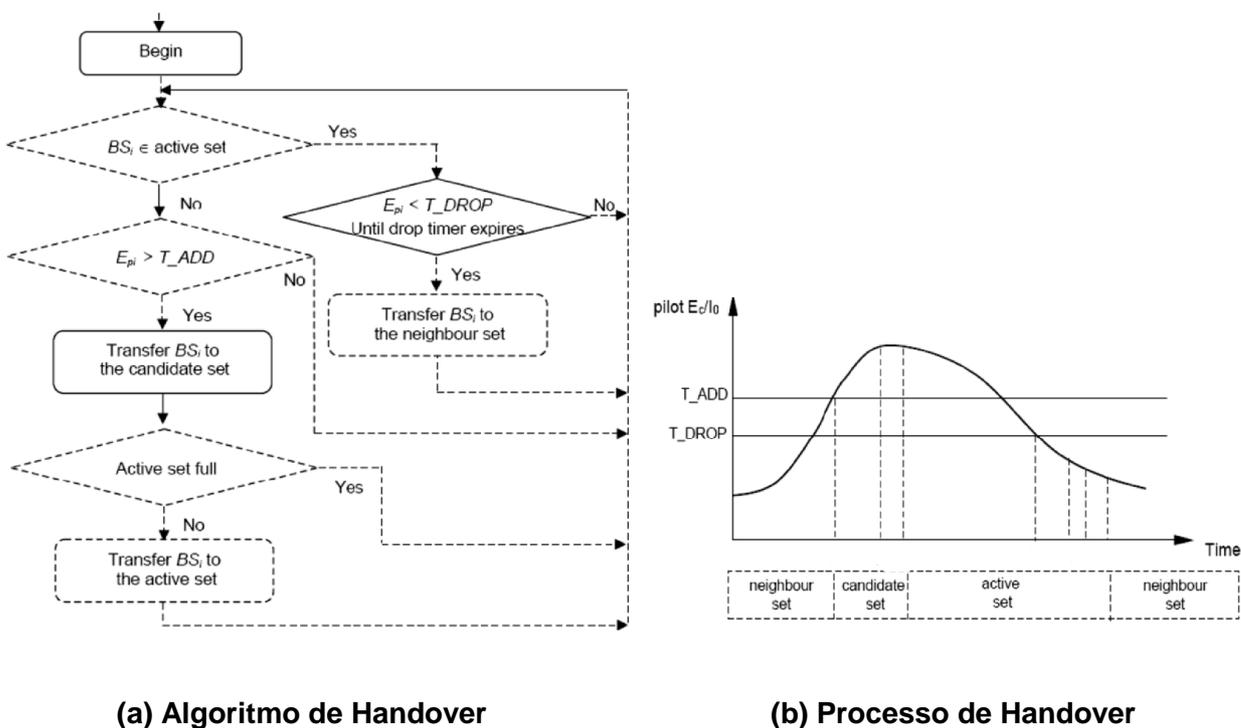
Além disso, a interferência co-canal, de acordo com a ETSI 300.392-2/2005, deve ser de 19dB. Contudo, de acordo com Ketterling (2004), a BTS pode tolerar valores de BER e interferência co-canal superior, no entanto, a Taxa de Bits na rede será reduzida com a adaptação ao cenário mais complexo.

Outro aspecto relevante refere-se à habilidade da BTS em comutar as estações móveis entre as células (“*handover*”). Para tanto, na rede TETRA o *handover* pode ser suave ou forçado. A Figura 23 apresenta a descrição das duas modalidades:



**Figura 23 – Handover TETRA**  
**Fonte: Adaptado Ketterling (2004).**

No *Hard Handover* - Fig. 23 (a) - a comutação do móvel entre as BTS é obrigatória, forçada, uma vez que a estação alcança o limite da área de cobertura da BTS – Célula 1. Por sua vez, o *Soft Handover* – Fig. 23 (b) - a comutação é feita a partir da análise da intensidade do sinal recebido pela BTS, de maneira “suave”, ao longo de seu deslocamento na Célula 1. Esse processo está descrito graficamente na Figura 24 a seguir:



**Figura 24 – Disposição das Estações Base TETRA**  
**Fonte: Adaptado Adaptado Ketterling (2004).**

O algoritmo – Fig. 24 (a) - inicia a análise da intensidade de sinal da estação móvel candidata, observando a variação do nível de RF recebido pela BTS – Fig. 24 (b). Se a célula vizinha receber um nível bem abaixo da célula ativa, o *handover* não ocorre. No entanto, se o nível da célula ativa estiver abaixo do aceitável ( $T\_Drop$ ), a central de roteamento e mobilidade processa a alocação da estação em outra célula, isto é, a estação móvel é registrada na célula vizinha (Ketterling, 2004).

Nesse sentido, é possível destacar que a BTS-TETRA consegue agregar complexidade e tecnologia ao desempenho mais exigente, o qual é esperado nos mercados PMR. As BTS-TETRA são responsáveis pelo acesso das estações fixas e móveis à rede troncalizada e por esse, e outros motivos, devem possuir os mais elevados níveis de confiabilidade e segurança (Ketterling, 2004).

## 2.4.2 Estação Fixa

A estação fixa (FS – sigla em inglês) TETRA também possui bastante tecnologia integrada em sua construção. A Figura 25, a seguir, apresenta um diagrama em blocos de uma FS que utiliza um microcontrolador com Codificador e Decodificador (CODEC) e Processador de Sinais Digitais (DSP – sigla em inglês):

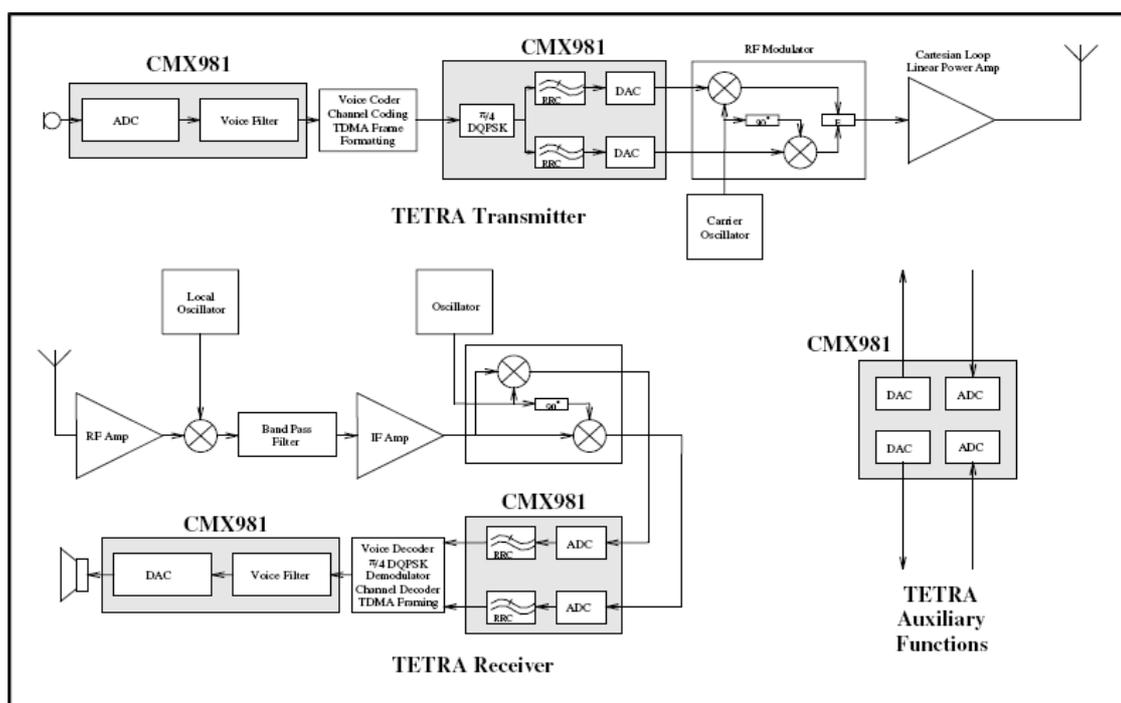


Figura 25 – Diagrama em Blocos da Estações Fixa TETRA

Fonte: Adaptado de [www.cmlmicro.com](http://www.cmlmicro.com)

No exemplo da Figura 25, o transceptor possui blocos separados para recepção e transmissão separados, uma vez que o equipamento necessita dessa característica para operação em modo “*full-duplex*”. No entanto, o oscilador local é comum para os dois módulos, uma vez que necessita de extremo sincronismo para operação TDMA (Ketterling, 2004).

Por sua vez, grande parte do processamento da FS-TETRA é realizada no interior do PIC CMX-981. Esse microprocessador possui um Codificador com Predição Linear Excitado com Código Algébrico (ACELP – sigla em inglês), formado pelo Conversor Digital para Analógico (DAC) e Analógico para Digital (ADC) nos módulos de recepção e transmissão respectivamente.

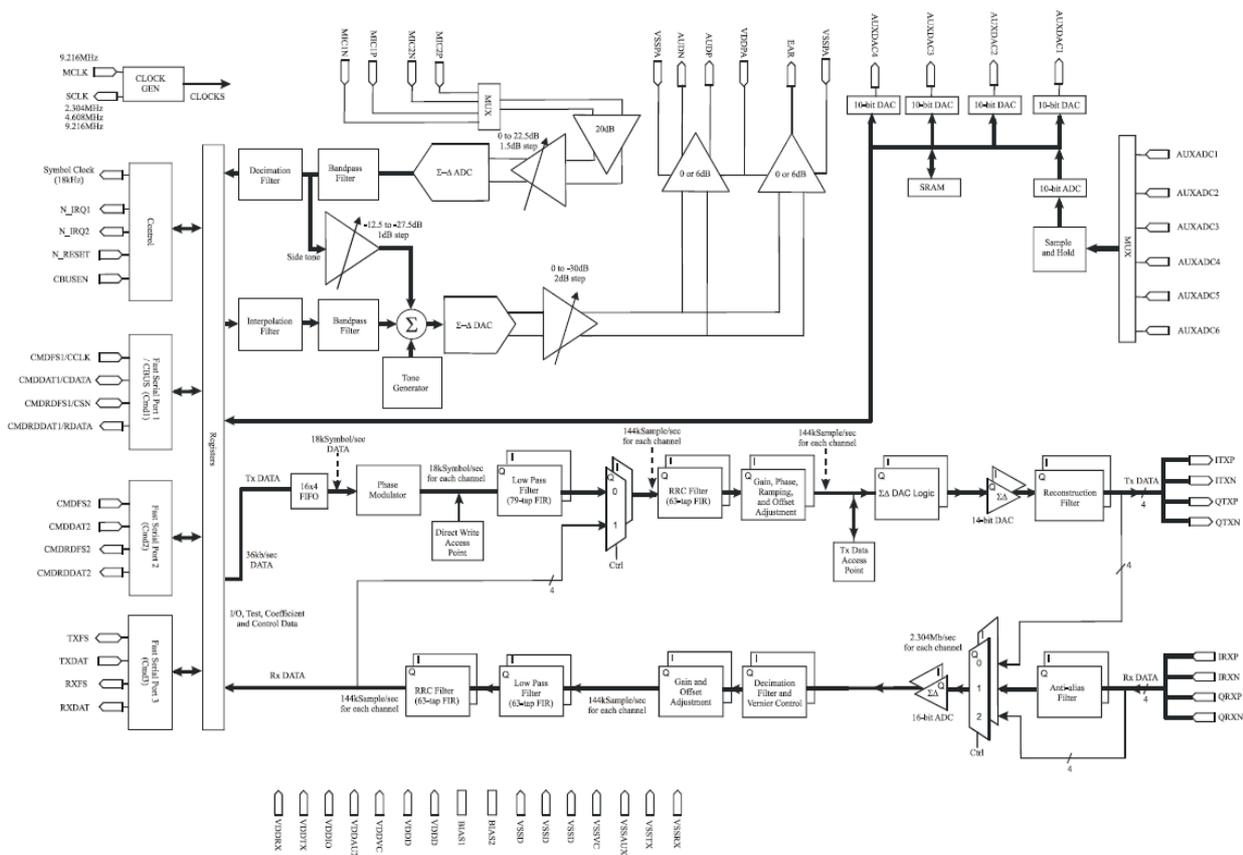
Além disso, esse componente eletrônico também é responsável pelas seguintes tarefas:

**TABELA 5 – FUNÇÕES DO MICROCONTROLADOR NA ESTAÇÃO FIXA TETRA**

<b>Módulo TETRA</b>	<b>Característica</b>
Transmissão	Controle FIFO Modulador $\pi/4$ DQPSK Ajuste de Ganho Conversor DAC
Recepção	Ajuste de Fase Filtro Anti-alias Conversor ADC

Fonte: Adaptado de [www.cmlmicro.com](http://www.cmlmicro.com)

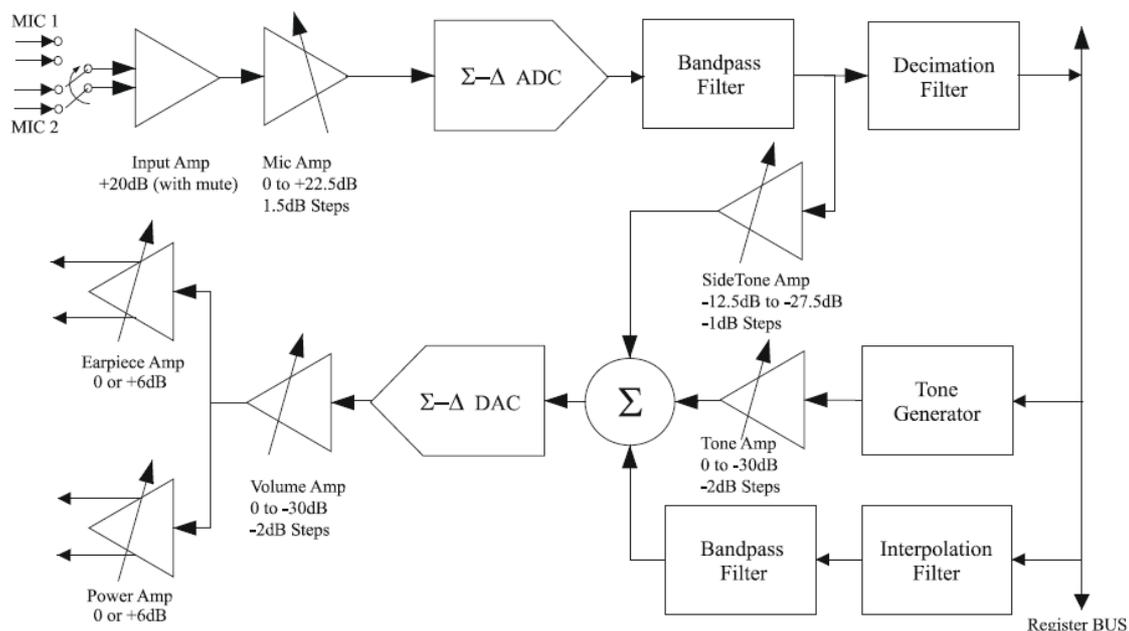
A Figura 26, a seguir, apresenta, detalhadamente, o interior do PIC CMX-981 que, tal como muitos outros, pode ser utilizado em uma estação fixa TETRA. Nessa figura é possível avaliar a complexidade do componente eletrônico que responde por quase todas as funções da estação:



**Figura 26 – Diagrama em Blocos do Processador CML/TETRA**  
 Fonte: Adaptado de [www.cmlmicro.com](http://www.cmlmicro.com)

Este microprocessador trabalha com um relógio principal de 9,216MHz e três portas seriais de comunicação. Além dessas portas, também existe uma *interface* de acesso direto para comandos de controle. As portas seriais são responsáveis pelo envio e recebimento dos dados de Transmissão (TX) e Recepção (RX). Esses dados passam por barramentos dedicados até os módulos de *buffer*, modulador de fase, filtro passas-baixa, e DAC ou ADC, dependendo do barramento de TX e RX.

A Figura 27 apresenta o processo de DAC e ADC da estação, que recebe os dados do barramento de registro:

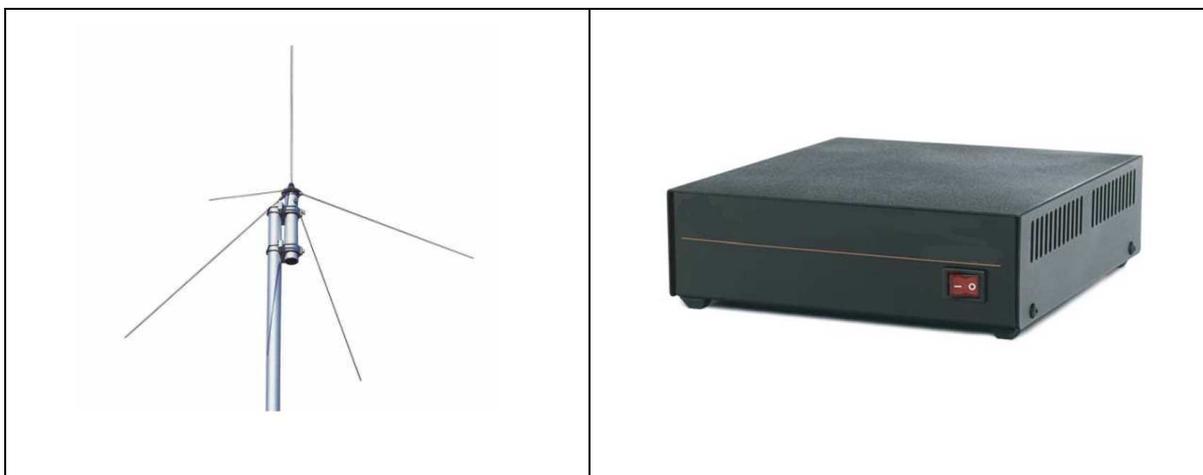


**Figura 27 – Diagrama em Blocos do CODEC-CML/TETRA**

Fonte: Adaptado de [www.cmlmicro.com](http://www.cmlmicro.com)

Na Figura 27, o barramento de registro entrega os dados demodulados a um gerador de tom e um filtro de interpolação. Esses sinais são somados e entregues ao DAC para recomposição do sinal de voz recebido na estação TETRA. Por sua vez, o microfone da estação passa por etapas de filtragem e amplificação para, em seguida, ser digitalizado no ADC com técnica ACELP. Esse sinal digital é filtrado e enviado ao barramento de registro para ser modulado e enviado ao módulo de potência de RF externo e à *interface* aérea.

A estação fixa conta ainda com o sistema irradiante, composto de cabo, conectores e antena, bem como de um sistema de alimentação, que pode utilizar energia da rede pública, ou banco de baterias. Esses itens são apresentados na Figura 28 abaixo:



**Figura 28 – Antena e Fonte de Alimentação da Estação Fixa**

### 2.4.3 Estação Móvel Veicular

A estação móvel veicular (VS – sigla em inglês) TETRA é bem semelhante à estação fixa, no entanto, difere do sistema irradiante e sistema de alimentação. A VS TETRA deve compartilhar com outros itens e acessórios do veículo em que está instalada a sua rede elétrica e estrutura física. Portanto, inicialmente, alguns cuidados devem ser observados, uma vez que ruídos, transientes e outros fatores externos podem interferir no funcionamento das comunicações.

Entre essas particularidades, a fiação elétrica do rádio transceptor deve ser dedicada e, preferencialmente, blindada. Esse cuidado é de fundamental importância para evitar a captação de emissões de RF da própria estação, e ainda, ruídos gerados pelo funcionamento do motor do veículo. Além disso, outros itens e acessórios elétricos podem comprometer a compatibilidade eletromagnética com a estação. Entre esses, sirenes e sinalizadores luminosos que possuem elevado consumo de corrente elétrica e podem gerar ruídos consideráveis na fiação elétrica.

Outro aspecto relevante nessa discussão está relacionado com o posicionamento do equipamento no interior do veículo. Essa característica deve levar em consideração as orientações do fabricante do veículo acerca de locais inapropriados (*airbag's*, exaustores, ar-condicionado, etc.), bem como do fabricante do equipamento, para evitar alterações no funcionamento da estação e comprometimento de sua vida útil.

O sistema irradiante também deve ser observado, de maneira a obter o máximo de eficiência do equipamento, sem com isso, danificar a estrutura do

veículo. Por exemplo, a instalação de uma antena em um veículo deve observar os critérios técnicos para respeitar o plano de irradiação, assim como evitar que a sua instalação comprometa outras partes de sua estrutura, como perfurações que possam comprometer a vedação da lataria à chuva e intempéries, ou abalar a sua resistência. A Figura 29 apresenta uma antena para operação móvel veicular:



**Figura 29 – Antena da Estação Móvel Veicular**

Também devem ser observados os aspectos ergonômicos para operação, e de segurança, para a condução do veículo. Considerando esses critérios, a estação móvel veicular estará apta a integrar a rede de comunicação TETRA.

#### **2.4.4 Estação Móvel Portátil**

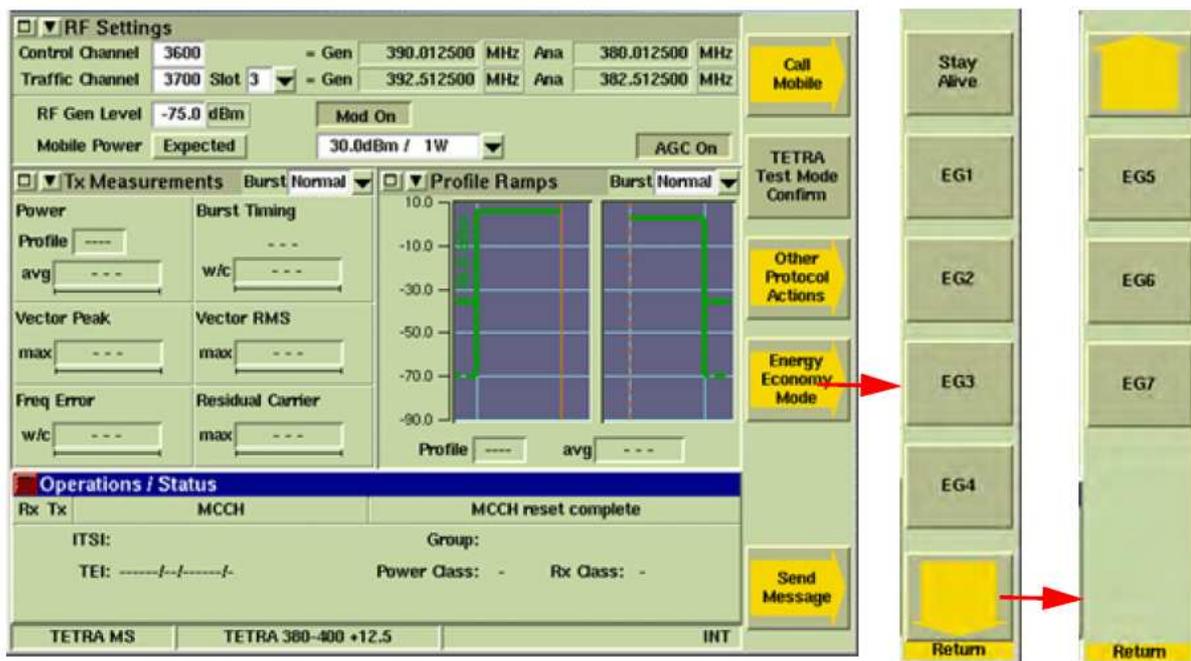
Tal como as estações base, fixa e móvel veicular, a estação móvel portátil também possui circuitos internos de processamento semelhante. No entanto,

difere no sistema de alimentação e irradiação, uma vez que a sua operação exige flexibilidade para uso externo.

Geralmente chamadas de “*Hand-Talk*” (HT), as estações portáteis necessitam de baterias para seu funcionamento e, por esse motivo, são dimensionadas para a operação nos diferentes modos: DMO, TMO e V+D. A durabilidade dessas fontes de energia portáteis para os equipamentos TETRA são o seu grande diferencial frente aos seus concorrentes tecnológicos.

Isso ocorre porque a estação portátil, por meio do monitoramento do nível de sinal de RF da estação base, consegue adequar a sua potência de emissão em até dez níveis diferentes. Para tanto, se a estação portátil estiver distante da base, ela utiliza maior potência de emissão de RF. Essa maior potência gera um consumo elevado de energia e reduz a durabilidade da bateria em um ciclo de carga. Entretanto, se a estação portátil se movimentar em direção a base, ela reduz essa potência e, conseqüentemente, prolonga a vida útil da bateria naquele ciclo de carga (Ketterling, 2004).

Essa característica é denominada de Modo de Economia de Energia (EEM – sigla em inglês) e é semelhante ao sistema utilizado na telefonia celular. Graças ao EEM, o equipamento portátil TETRA pode ter prolongado seu funcionamento efetivo durante um período de carga, permitindo maior conforto e conveniência ao seu usuário. A Figura 30, a seguir, apresenta a tela de um equipamento de teste utilizado para verificação dessa funcionalidade no equipamento portátil:



**Figura 30 – Teste do Modo de Economia de Energia da Estação Portátil**  
 Fonte: [www.aeroflex.com](http://www.aeroflex.com)

Por sua vez, o sistema irradiante da estação portátil também deve ser robusto e eficiente para emissão e recepção de RF na rede TETRA. Em geral, essas antenas possuem proteção externa contra choques físicos e/ou torções, muito comuns na utilização desses equipamentos no ambiente externo.

#### 2.4.5 Equipamentos Comerciais

O Fórum TETRAMoU possui dezenas de empresas participantes do processo de desenvolvimento e certificação de produtos com a tecnologia TETRA. Em função dessa grande participação, não é difícil localizar no mercado global fornecedores de soluções em telecomunicações baseadas no padrão TETRA. A Figura 31, a seguir, apresenta alguns desses produtos:



(a) Estação Base Motorola



(b) Estação Móvel EADS



(c) Estação Fixa EFJohnson



(d) Estação Portátil EADS

**Figura 31 – Equipamentos Comerciais TETRA**  
**Fonte: Site dos Fabricantes**

O grande número de fornecedores coloca o padrão TETRA em condição privilegiada em relação aos demais, pois a concorrência global estimula a redução dos preços dos equipamentos e afasta a possibilidade de restrições no mercado.

### Capítulo 3

#### ***Projeto da Rede Digitalizada***

O projeto da rede de radiocomunicação digitalizada se inicia a partir da definição dos parâmetros básicos de demanda exigida para as comunicações durante a realização dos jogos da Copa do Mundo de Futebol em Belo Horizonte. Nesse aspecto, inicialmente, devem ser considerados o perímetro de segurança a ser atendido e o número de estações envolvidas no policiamento ostensivo antes, durante e depois do evento. De acordo com esses parâmetros, será possível determinar o tráfego e a área de cobertura desejada para a rede. Após a definição destas características, serão estabelecidos os pontos de repetição e dimensionados os sítios com as estações base.

De acordo com a tabela de jogos do último torneio realizado na África do Sul, uma cidade sede pode realizar entre 3 a 7 jogos, sendo distribuídos no intervalo de tempo de 30 dias. Além disso, as equipes envolvidas podem se alojar de 30 a 60 dias antes do início do campeonato, com uma delegação de até 4 países por cidade sede (FIFA, 2010).

Para cada jogo, de acordo com o último evento, cerca de 40.000 a 60.000 torcedores são esperados em um estádio, os quais são compostos, em sua grande maioria, de visitantes estrangeiros. De acordo com esses números iniciais, e considerando a possibilidade de um torcedor assistir apenas um jogo de sua seleção, o evento poderá mobilizar na cidade sede cerca de 420.000

espectadores nos estádios. Além disso, deve ser considerada a possibilidade de cada uma dessas pessoas trazerem consigo, pelo menos, um acompanhante que não assista aos jogos, mas que faça uso do espaço local para entretenimento enquanto aguarda o término do evento. Portanto, podem ser admitidos até 840.000 turistas em uma cidade sede para acompanhar os jogos da Copa.

Também devem ser contabilizados jornalistas, pessoal técnico e comerciantes temporários que poderão passar pela cidade. Considerando os números do último evento, entre turistas e profissionais, a cidade sede da final da Copa, Joanesburgo, recebeu cerca de 1 milhão de pessoas durante todo o evento (FIFA, 2010).

De acordo com esse fluxo de pessoas é possível determinar o número de policiais necessários para o cerco de segurança durante o evento. Para tanto, o critério adotado é definido pela Organização das Nações Unidas (ONU) que estabelece 1 policial para 250 habitantes. Atualmente, Belo Horizonte possui 2.452.617 habitantes, que devem ser somados ao 1 milhão de visitantes. Logo, pelo menos 13.810 policiais devem ser empregados durante os 30 dias de evento. Esses policiais devem trabalhar em turnos de 4 horas, compondo grupos de 3.452 policiais nas ruas e 10.358 de sobreaviso.

Os policiais que estiverem nas ruas devem atender ocorrências rotineiras, e ainda, aquelas específicas do evento, tal como combate ao tráfico de drogas e controle de trânsito. Para o atendimento de rotina, atualmente, cerca de 2.500 policiais atuam nas ruas da capital mineira e, durante eventos extraordinários

como a “Operação de Natal”<sup>2</sup>, mais 1.500 policiais são empregados no policiamento a pé e em 2.000 viaturas (Agência Minas, 2009).

De acordo com estas informações é possível definir o número mínimo de 3.500 policiais por turno durante o evento, bem como o número de veículos envolvidos. Assim, podem ser necessárias cerca de 3.500 estações móveis-portáteis (policiais a pé) e 2.000 estações móveis-veiculares para atendimento desta demanda. Trata-se de um quantitativo razoável, uma vez que durante os jogos Pan-Americanos do Rio de Janeiro, em 2007, foram utilizadas estações de rádio digitais nessas proporções.

Estimados os números de estações é necessário estabelecer a demanda por tráfego na rede. De acordo com Shao (2004) e Ketterling (2004), o tráfego de voz de órgãos de segurança pode alcançar até 50 Erl por usuário, adotando a seguinte característica:

*“Um estudo recente na Alemanha revelou uma duração típica de grupo de chamada de 90 segundos para a polícia e bombeiros, enquanto a polícia jurídica usando principalmente telefones móveis em redes públicas, com uma duração típica chamada de 150 segundos.” (Ketterling, 2004:74)*

Estabelecidos os parâmetros quantitativos estações e tráfego, é possível avançar na análise da rede, estudando o perímetro de segurança para cobertura, os pontos de repetição e dimensionamento dos sítios com as estações base.

---

<sup>2</sup> “Operação Natalina” é o nome dado a ação do policiamento ostensivo durante os 15 dias que antecedem o Natal na capital mineira. Esta intervenção extraordinária garante maior segurança aos cidadãos que se deslocam para as áreas comerciais para fazerem compras de Natal. Em geral, esta operação incrementa mais 1.500 policiais nas ruas de Belo Horizonte (Agência Minas, 2009).

Além disso, ressalta-se que neste trabalho não foram consideradas as demandas de tráfego de dados e interconexão com a rede telefonia pública, uma vez que não representam o interesse fim da atividade de segurança no policiamento durante o evento. Apenas o tráfego de voz foi considerado para os cálculos a seguir.

### **3.1 Dimensionamento do Sítio das Estações Base**

Nesta etapa do projeto são dimensionados os sítios de repetição com as estações base da rede. Para tanto, será analisado o pior caso, isto é, o ponto onde existirá a maior demanda por tráfego na rede. Este cenário deve ocorrer durante os jogos da Copa, no Estádio Mineirão, isto é, no local onde devem convergir todos os fluxos migratórios de turistas em um curto espaço de tempo.

Considerando os números iniciais, até 60.000 espectadores podem ser esperados em um jogo da Copa de 2014. Além desses visitantes também são esperados profissionais diretos e indiretos da organização do evento. Entendendo que cerca 200.000 pessoas podem se concentrar dentro e fora do estádio, e seguindo as recomendações da ONU para o público temporário e residente, o policiamento no local e entorno pode utilizar até 1.200 policiais. Além disso, esses policiais, geralmente, podem atuar em grupos de 2 a 6 indivíduos. Portanto, podem ser necessárias entre 600 e 1.000 estações móveis-portáteis e móveis-veiculares (Agência Minas, 2009).

A cobertura da rede no ponto mais crítico deve ser avaliado nesse estudo, o qual pode ser esperado nos dias de jogos no Estádio do Mineirão. Para tanto, são considerados os seguintes parâmetros para cálculo:

**Tabela 6 – Parâmetros Utilizados para Dimensionamento do Tráfego**

Parâmetro	Valor
Estações	1.000
Tráfego	50 Erl
Tempo médio das Chamadas	90s

Fonte: Adaptado de Ketterling (2004) e Stavroulakis (2007)

Ketterling (2004) e Stavroulakis (2007) recomendam, para Segurança Pública, um estudo de tráfego baseado na distribuição de Poisson seguindo o modelo de Erlang “C”. Neste cálculo é prevista uma fila de espera, não há bloqueio, uma vez que todas as chamadas dos agentes de segurança devem ser completadas. A fórmula de Erlang “C” pode ser avaliada a seguir:

$$P(>0) = \frac{\frac{A^N N}{N! (N-A)}}{\sum_{i=0}^{N-1} \frac{A^i}{i!} + \frac{A^N N}{N! (N-A)}} \quad (1)$$

Onde:

P = Probabilidade de Espera

N = Número de Canais

A= Tráfego (Erl)

Stavroulakis (2007) admite Grau de Serviço (GoS) de 5% para satisfazer a demanda por tráfego de uma rede de Segurança Pública. Para tanto, utilizando os parâmetros da Tabela 6 e a fórmula de Erlang “C” verifica-se que são necessários 64 canais de rádio para atender a demanda da rede. No caso da rede TETRA,

cada canal de rádio suporta 4 estações em modo de voz e, portanto, são necessários, pelo menos, 16 portadoras para escoar o tráfego desejado na célula do Estádio Mineirão.

Além disso, de acordo com a Resolução 435/2006 da Anatel, não há previsão de setorização inferior a 60°, uma vez que a rede não exige coordenação rigorosa das frequências na faixa de 380 MHz, exclusiva para Segurança Pública. De acordo com o referido documento, os canais disponibilizados para esta faixa estão elencados na Tabela 7 a seguir:

**Tabela 7 – Canais Disponíveis para Licenciamento**

Canal	Transmissão de Subida (MHz)	Transmissão de Descida (MHz)
1	381,050	391,050
2	381,075	391,075
3	381,100	391,100
4	381,125	391,125
5	381,150	391,150
6	381,175	391,175
7	381,200	391,200
8	381,225	391,225
9	381,250	391,250
10	381,275	391,275
11	381,300	391,300
12	381,325	391,325
13	381,350	391,350
14	381,375	391,375
15	381,400	391,400
16	381,425	391,425
17	381,450	391,450
18	381,475	391,475
19	381,500	391,500
20	381,525	391,525
21	381,550	391,550
22	381,575	391,575

### Continuação da Tabela 7 – Canais Disponíveis para Licenciamento

Canal	Transmissão de Subida (MHz)	Transmissão de Descida (MHz)
23	381,600	391,600
24	381,625	391,625
25	381,650	391,650
26	381,675	391,675
27	381,700	391,700
28	381,725	391,725

Fonte: Adaptado da Resolução 435 – Anatel/2006

Portanto, o sítio que atenderá o Estádio Mineirão deve possuir, pelo menos, 16 estações base, respeitando os canais disponibilizados na legislação vigente. O sistema irradiante, isto é, as antenas, deve possuir dispositivo que seja capaz de atender os 16 canais utilizados na faixa de 380 MHz.

Considerando a topologia de *cluster* com 7 células, os 12 canais restantes, devem ser combinados em 6 células adjacentes de 3,8km<sup>2</sup> de área de cobertura. Cada uma dessas células adjacentes deverá utilizar 2 portadoras, que são capazes de suprir um tráfego de 3,87 Erl, com GoS de 5% para 4 estações por portadora em modo de voz.

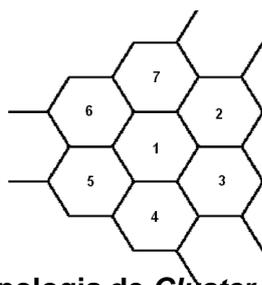
A outra célula de grande importância nesta rede deve cobrir o hiper-centro da capital mineira, onde haverá grande concentração e fluxo de pessoas. Nesta célula as características de tráfego são semelhantes ao entorno do Estádio Mineirão, e por isso, podem ser adotados os mesmo parâmetros para atendimento da demanda de canais.

A coordenação das frequências no *cluster* modelo pode adotar a seguinte estrutura:

**Tabela 8 – Coordenação de Frequências**

Célula	Transmissão de Subida (MHz)	Transmissão de Descida (MHz)
1- Principal	381,050	391,050
	381,075	391,075
	381,100	391,100
	381,125	391,125
	381,150	391,150
	381,175	391,175
	381,200	391,200
	381,225	391,225
	381,250	391,250
	381,275	391,275
	381,300	391,300
	381,325	391,325
	381,350	391,350
	381,375	391,375
	381,400	391,400
381,425	391,425	
2	381,450	391,450
	381,475	391,475
3	381,500	391,500
	381,525	391,525
4	381,550	391,550
	381,575	391,575
5	381,600	391,600
	381,625	391,625
6	381,650	391,650
	381,675	391,675
7	381,700	391,700
	381,725	391,725

A topologia sugerida é a seguinte:

**Figura 32 – Topologia de Cluster com 7 Células**

### 3.2 Análise da Área de Cobertura

A área de cobertura da rede deve contemplar os pontos críticos de segurança no perímetro estabelecido e segmentos de fronteira/transição deste território com a topologia sugerida no item anterior. Em função disso, devem ser identificados os pontos críticos de segurança na cidade. Este levantamento pode ser avaliado na Tabela 9 a seguir:

**Tabela 9 – Pontos Críticos de Segurança em Belo Horizonte**

Nome	Justificativa
Aeroporto da Pampulha	Chegada e saída de turistas/profissionais regionais
Aeroporto Internacional de Confins	Chegada e saída de turistas/profissionais internacionais
Avenida Antônio Carlos	Acesso ao Mineirão e acesso local
Avenida Catalão	Acesso ao Mineirão e acesso local
Centro Bancário e de Câmbio	Preservação do entorno
Centro de Imprensa	Controle de acesso e preservação do entorno
Centro de Representação Diplomática Oficial	Controle de acesso e preservação do entorno
Estações do Metrô	Fluxo de turistas/profissionais, bem como acesso local

**Continuação da Tabela 9 – Pontos Críticos de Segurança em Belo Horizonte**

Nome	Justificativa
Estádio Gov. Magalhães Pinto (Mineirão)	Realização dos Jogos
Hospitais de Pronto-Socorro	Fluxo de turistas/profissionais, bem como uso local
Hotéis de Delegação	Controle de acesso e preservação do entorno
Linha Verde	Fluxo de turistas/profissionais, bem como acesso local
Rodovia BR-040	Fluxo de turistas/profissionais, bem como acesso local
Rodovia BR-381	Fluxo de turistas/profissionais, bem como acesso local
Rodovia BR-262	Fluxo de turistas/profissionais, bem como acesso local
Rodovia MG-010	Fluxo de turistas/profissionais, bem como acesso local
Rodovia MG-424	Fluxo de turistas/profissionais, bem como acesso local
Terminal Rodoviário	Fluxo de turistas/profissionais, bem como acesso local
Terminal Ferroviário	Fluxo de turistas/profissionais, bem como acesso local

Fonte: Adaptado de Lacerda (2009).

De acordo com os pontos elencados, a cobertura da rede de rádio deve

contemplar, no mínimo, a área do hiper-centro da capital, entorno do estádio Mineirão e vias de acesso aos aeroportos de Confins e Pampulha. Contudo, devem ser consideradas ainda as áreas de fronteira com esses pontos, o que amplia a cobertura da rede para toda a cidade e vias de acesso às rodovias que atendem ao aeroporto de Confins. Dessa maneira, a Figura 33, a seguir, apresenta uma área de cobertura desejável para a rede de rádio do evento:



**Figura 33 – Área de Cobertura Desejável da Rede de Rádio na Copa de 2014**  
Fonte: Adaptado do Google Maps™

Este perímetro possui área aproximada de 150 km<sup>2</sup>, com altimetria variando entre 500 a 1300 metros acima do nível do mar. Além disso, a topografia também é bastante variada, alternado de alta densidade de edificações no hipercentro da cidade a zonas de vale com vegetação tropical/serrado de até 5 metros nas proximidades do aeroporto de Confins.

A topologia da rede proposta adota a formatação sugerida por Rappaport (1996) com *cluster* hexagonal de 7 células e reuso de freqüências. Ressalta-se ainda neste estudo o Relatório M.2014 da União Internacional de Telecomunicações, que recomenda área de até 3,8 km<sup>2</sup> para cada célula em um relevo com baixa declividade e pouca obstrução (ITU, 1998). No caso de Belo Horizonte, este tamanho pode ser ainda menor, uma vez que as características do terreno não favorecem a propagação na faixa de 380 MHz – Faixa licenciada pela Anatel. Portanto, se faz necessário um estudo de predição cauteloso para garantir a cobertura da área desejada com o menor custo possível.

Para análise da cobertura e definição da localização dos sítios das estações base será utilizado o *Software Rádio Mobile* versão 10.6.9. Trata-se de um *software* livre de mapeamento e predição, com resultados satisfatórios para as faixas de VHF e UHF. O *Radio Mobile* utiliza o método proposto por Longley (1978) para modelagem e predição dos sinais de rádio em áreas urbanas.

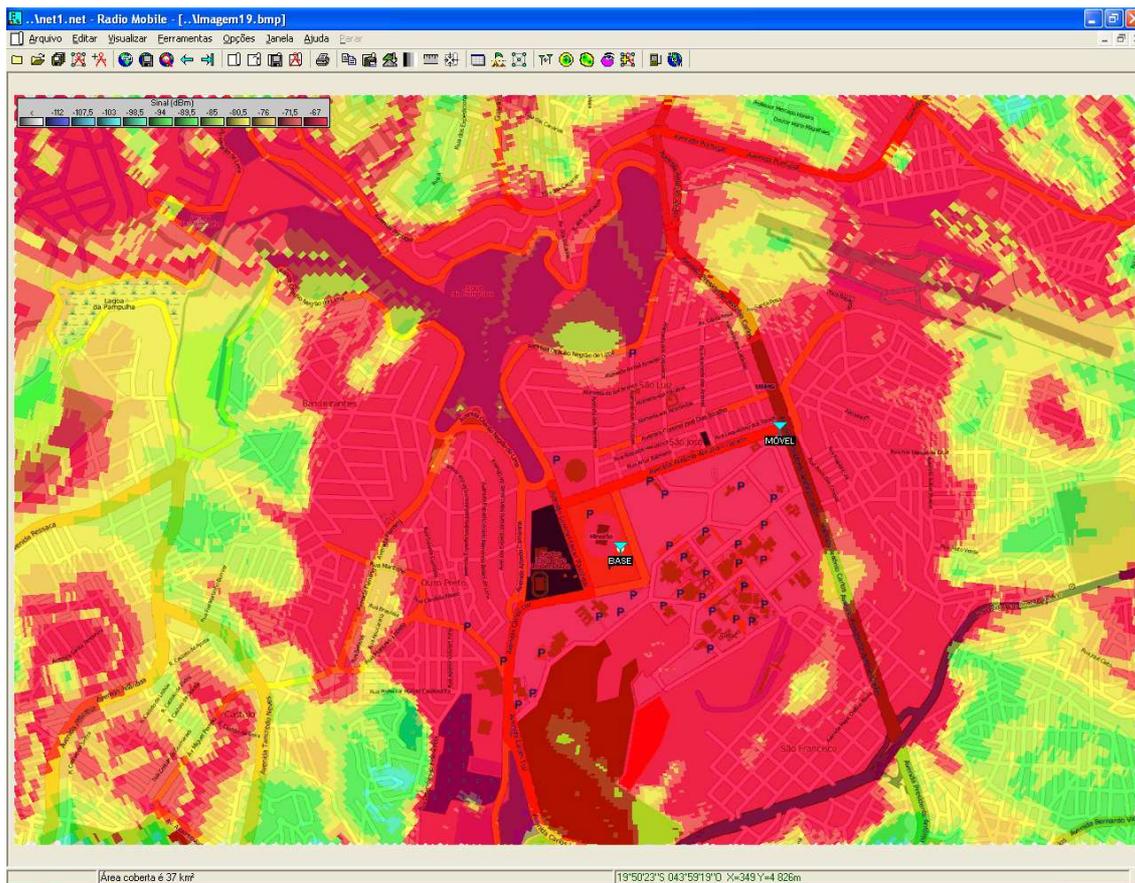
A base dos mapas topográficos utilizados no *Radio Mobile* é disponibilizada livremente pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Estes mapas possuem como fonte primária modelos digitais de elevação, com aproximadamente 90 metros de resolução espacial, originários da missão de mapeamento do relevo terrestre *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Os

dados obtidos pelo mapeamento foram disponibilizados pela *United States Geological Survey* (USGS) e compartilhados com a Embrapa (Miranda, 2010).

Os modelos digitais de elevação utilizados foram gerados por um processo denominado “*interferometria de radar*”. Neste processo, o sinal emitido pelo radar é recebido por duas antenas separadas por uma distância fixa (60 m), permitindo o cálculo da elevação da superfície, com uma tolerância vertical absoluta de 16 metros. De acordo com Miranda (2010), estas características garantem 90% de confiança na análise do relevo nos mapas utilizam estes modelos digitais de elevação.

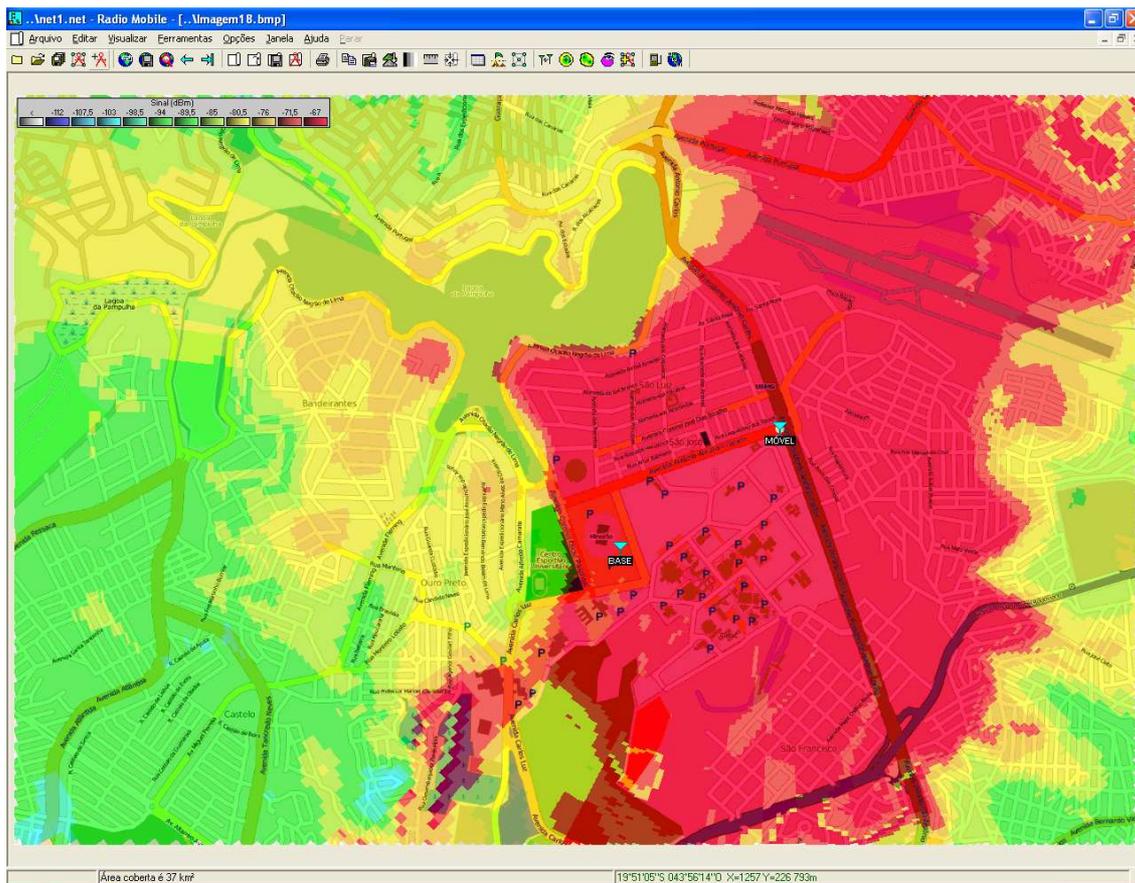
Os dados originais dos mapas deste trabalho foram obtidos em formato *raster*, com resolução radiométrica de 16 bits, em formato HGT, projeção geográfica, elevações referenciadas para o geóide WGS84 EGM96 e datum horizontal WGS84 (Miranda, 2010).

A Figura 34, a seguir, apresenta a predição de uma célula para cobertura da rede no entorno do estádio Mineirão. As manchas na cor vermelha indicam níveis de sinal de até -71 dBm, com mínimo aceitável na cor azul que representa -112 dBm. Na simulação, a Estação base tem potência de 5W na faixa de 380 MHz, está localizada ao lado do estádio, com antena omnidirecional de 3dBi instalada em uma torre de 30 metros.



**Figura 34 – Cobertura da Célula do Entorno do Mineirão – Base para Móvel**

A Figura 34 apresenta a modelagem de emissão da estação base para o móvel, no entanto, também se faz necessário conhecer o caminho inverso de propagação, isto é, do móvel para a base. Para tanto, foi selecionado o pior caso neste cenário, onde o móvel estaria se deslocando entre os cruzamentos das Avenidas Abraão Caran e Antônio Carlos, no ponto mais baixo nas proximidades do estádio. Neste cenário, o móvel também opera na faixa de 380MHz, com 1W de potência, antena omnidirecional de 0dBi a 2 metros do solo. Esta simulação pode ser avaliada na Figura 35 a seguir:



**Figura 35 – Cobertura da Célula do Entorno do Mineirão – Móvel para Base**

Para a predição foram utilizados os parâmetros descritos na Tabela 10 abaixo. Estes valores foram propostos por Longley (1978) e adaptados para o cenário da capital mineira:

**Tabela 10 – Parâmetros Utilizados para Predição**

Parâmetro	Valor
Refratividade do Solo	350 N-Unidades
Condutividade do Solo	0,020 S/m
Permissividade do Solo	15

### Continuação da Tabela 10 – Parâmetros Utilizados para Predição

Parâmetro	Valor
Modo Estatístico	Móvel / 99% do tempo
Polarização	Vertical
Clima	Sub-tropical Continental
Frequência	380MHz
Modelo	Longley (1978)
Potência da Base	5W
Potência do Móvel	1W
Antena da Base	3dBi Ominidirecional
Altura da Antena da base	15m
Antena do Móvel	0dBi Ominidirecional
Altura da Antena do Móvel	2m

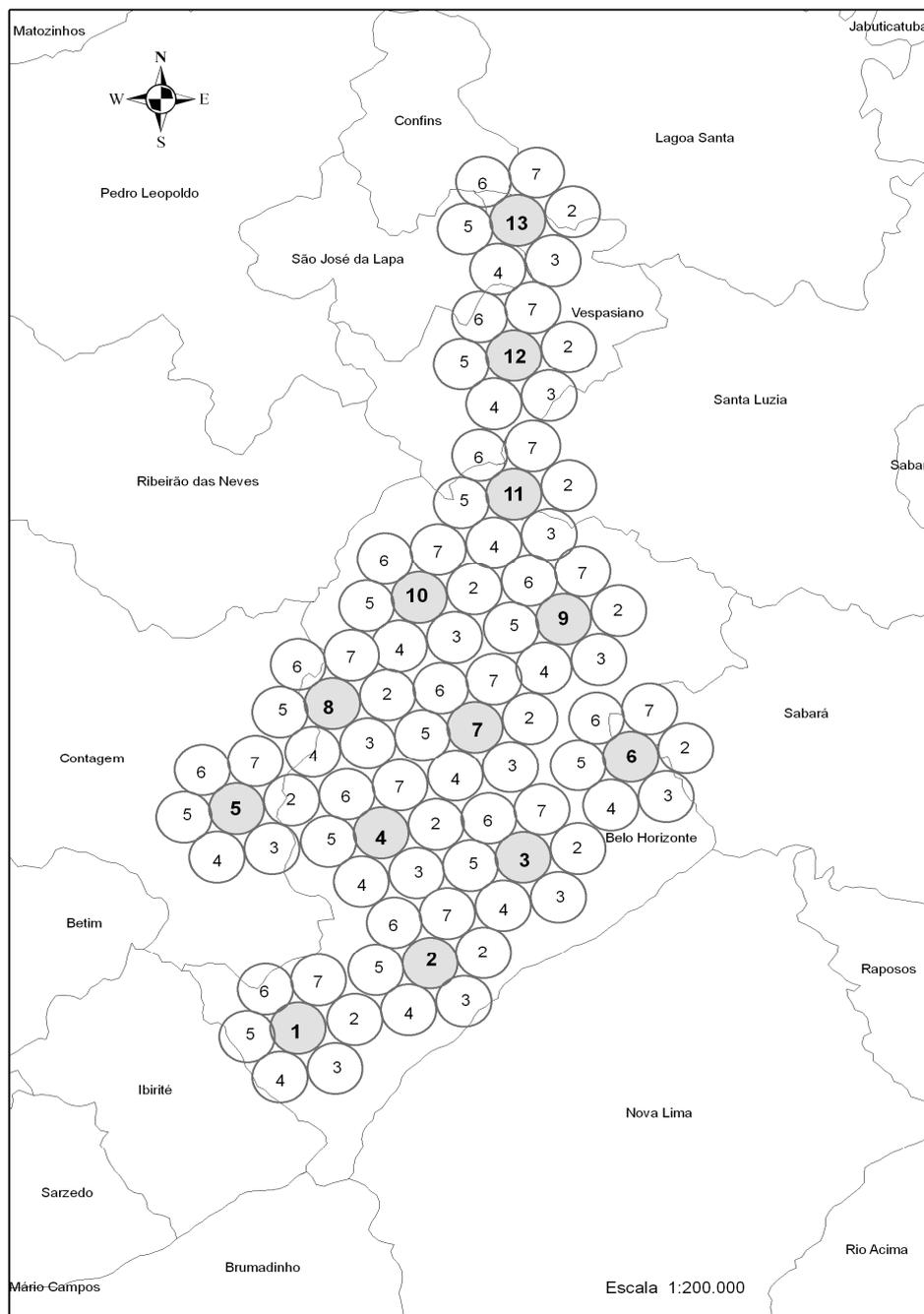
Fonte: Adaptado de Longley (1978).

### 3.3 Levantamento dos Pontos de Repetição

Conforme observado no item anterior, a instalação de uma estação base no entorno do estádio Mineirão é imprescindível para garantir a qualidade do serviço durante o evento, no entanto, as áreas mais distantes exigem um estudo de viabilidade para instalação de torres em pontos topograficamente privilegiados. Neste estudo de viabilidade devem ser consideradas a topologia da rede, os aspectos técnicos e paisagísticos, bem como a legislação municipal pertinente ao uso do solo e de preservação do meio ambiente.

De acordo com a demanda por *cluster* de 7 células e reuso de frequências,

a topologia sugerida para a rede deverá possuir um formato semelhante ao observado na Figura 36 (a seguir). Nesta figura, as células principais estão na cor cinza e correspondem a célula 1 do *cluster*. O número do *cluster* está no interior da célula principal.



**Figura 36 – Topologia da Rede TETRA para a Copa de 2014**

Para atender a topologia disposta na Figura 36, são necessários 13 *clusters* com 91 células para instalação de estações base. Estes pontos foram escolhidos entre as localidades indicadas no processo de modelagem e predição com o *software Radio Mobile* e indicados na Tabela 11 a seguir:

**Tabela 11 – Pontos Sugeridos para Instalação de Estações Base**

Ponto	Cluster	Célula	Latitude	Longitude
1	1 Barreiro	1	-19,98857	-44,02355
2		2	-19,99561	-43,99865
3		3	-20,01285	-44,01401
4		4	-20,01461	-44,03853
5		5	-19,99051	-44,04471
6		6	-19,97151	-44,04209
7		7	-19,97380	-44,01251
8	2 Belvedere	1	-19,97428	-43,94645
9		2	-19,98835	-43,92941
10		3	-20,00594	-43,95038
11		4	-19,98888	-43,97416
12		5	-19,97498	-43,96985
13		6	-19,96003	-43,95918
14		7	-19,96143	-43,93372
15	3 Serra	1	-19,89551	-43,89151
16		2	-19,87651	-43,87467
17		3	-19,90171	-43,87846
18		4	-19,91755	-43,89670
19		5	-19,90237	-43,90793
20		6	-19,88509	-43,90190
21		7	-19,8711	-43,89165
22	4 Contagem	1	-19,94215	-44,05626
23		2	-19,94901	-44,03057
24		3	-19,96313	-44,06145
25		4	-19,95772	-44,08911
26		5	-19,93674	-44,09767
27		6	-19,91589	-44,07619
28		7	-19,92645	-44,04208

**Continuação da Tabela 11 – Pontos Sugeridos para Instalação de Estações Base**

Ponto	Cluster	Célula	Latitude	Longitude
29	5 Gameleira	1	-19,94842	-43,98096
30		2	-19,93073	-43,98489
31		3	-19,95937	-43,97226
32		4	-19,93364	-43,97155
33		5	-19,9496	-44,00398
34		6	-19,97164	-43,99401
35		7	-19,93694	-43,99654
36	6 Via Leste	1	-19,84906	-43,90498
37		2	-19,86133	-43,90708
38		3	-19,85711	-43,87327
39		4	-19,84906	-43,90498
40		5	-19,86806	-43,92405
41		6	-19,83085	-43,91606
42		7	-19,83059	-43,88449
43	7 Centro	1	-19,90468	-43,92429
44		2	-19,93371	-43,91602
45		3	-19,95495	-43,91924
46		4	-19,94479	-43,93693
47		5	-19,94175	-43,95700
48		6	-19,9184	-43,96430
49		7	-19,90165	-43,95012
50	8 Via Oeste	1	-19,90725	-44,01437
51		2	-19,89775	-43,99052
52		3	-19,92189	-43,98898
53		4	-19,9314	-44,01171
54		5	-19,91121	-44,03472
55		6	-19,89537	-44,04019
56		7	-19,88271	-44,01816
57	9 Juliana	1	-19,81396	-43,93373
58		2	-19,82861	-43,93935
59		3	-19,8170	-43,90204
60		4	-19,79708	-43,90835
61		5	-19,77187	-43,89783
62		6	-19,77332	-43,92994
63		7	-19,80750	-43,94720

**Continuação da Tabela 11 – Pontos Sugeridos para Instalação de Estações Base**

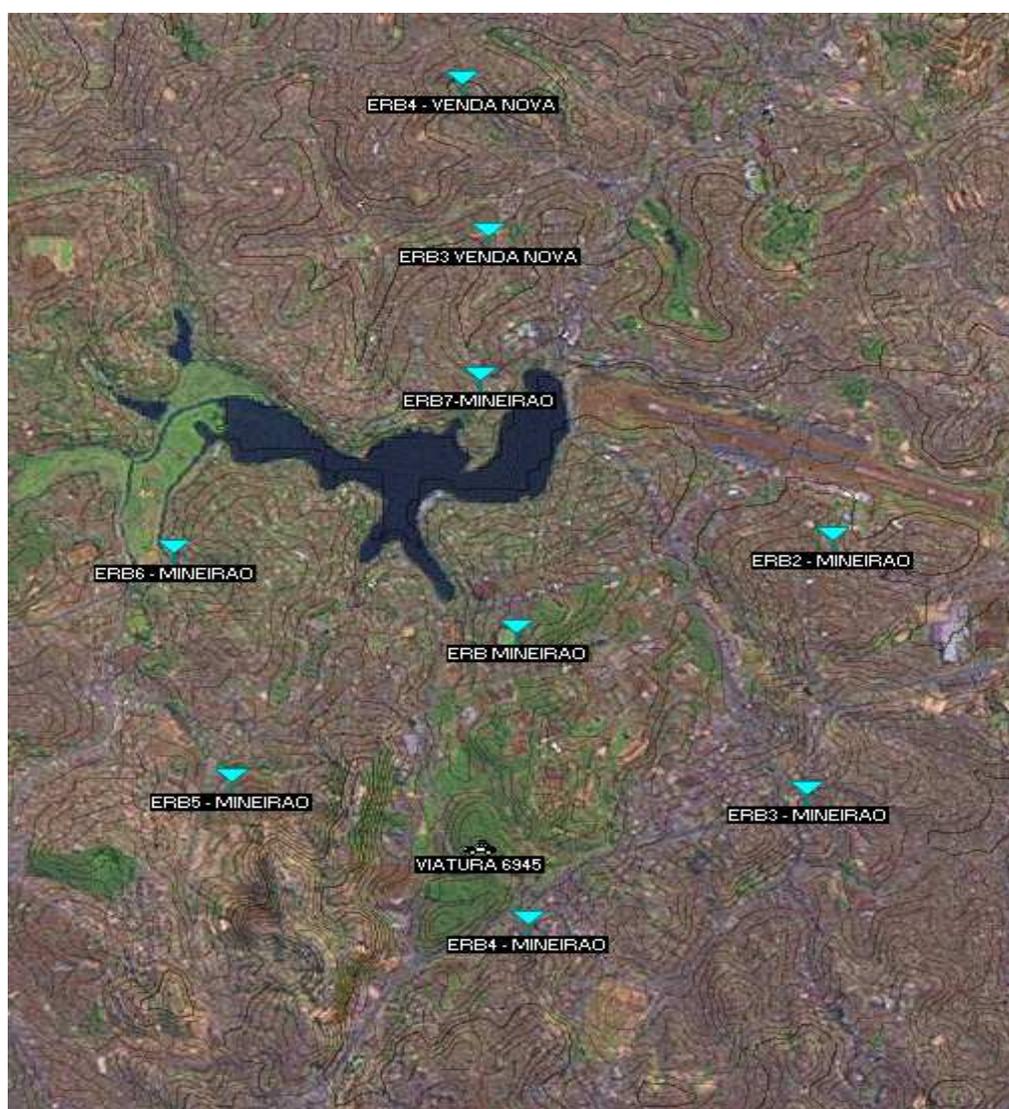
Ponto	Cluster	Célula	Latitude	Longitude
64	10 Mineirão	1	-19,86587	-43,97072
65		2	-19,85830	-43,94846
66		3	-19,87924	-43,95033
67		4	-19,88997	-43,96978
68		5	-19,87818	-43,99055
69		6	-19,85936	-43,99467
70		7	-19,84511	-43,97315
71	11 Venda Nova	1	-19,8013	-43,97409
72		2	-19,78863	-43,95575
73		3	-19,83323	-43,97263
74		4	-19,82065	-43,97446
75		5	-19,80974	-43,99186
76		6	-19,78881	-43,99504
77		7	-19,78142	-43,97484
78	12 Vespaziano	1	-19,73561	-43,95546
79		2	-19,74599	-43,93172
80		3	-19,75285	-43,9962
81		4	-19,71467	-43,99228
82		5	-19,70218	-43,91265
83		6	-19,73596	-43,97901
84		7	-19,71731	-43,93078
85	13 Confins	1	-19,63611	-43,9632
86		2	-19,62204	-43,91836
87		3	-19,66602	-43,90696
88		4	-19,69312	-43,93237
89		5	-19,70068	-43,96358
90		6	-19,67218	-44,00151
91		7	-19,62697	-44,00244

Obs.: Formato de coordenadas adotado pelo software *Radio Mobile*.

Após a seleção dos pontos nas localidades disponíveis, a análise avança com a predição do sinal para cada uma das 91 células da rede. Neste estudo, o critério adotado é o mesmo para o entorno do Estádio Mineirão e observado nas Figuras 34 e 35. A Figura 37, a seguir, apresenta a localização das estações base no entorno do Estádio Mineirão após a predição para cada uma das células da

rede. Esta análise de cobertura foi feita no sentido base-móvel e móvel-base, nos pontos sugeridos segundo a modelagem de cobertura com o *Software Radio Mobile* e sobreposição das imagens de satélite e curvas de nível do terreno.

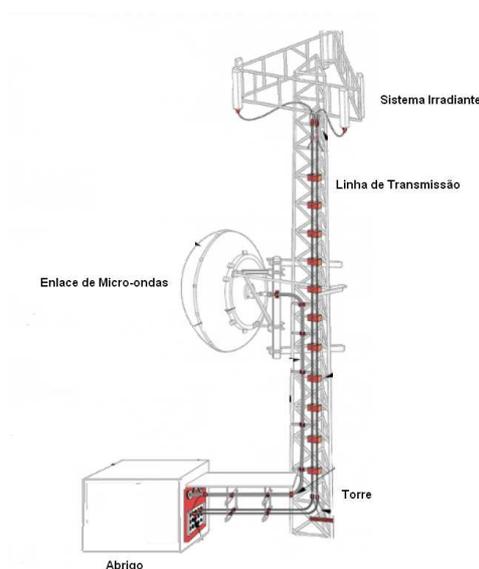
Ressalta-se ainda a possibilidade otimização dos trabalhos de instalação das estações base de acordo com a execução do projeto. Este procedimento pode acrescentar mais eficiência ao sistema, com o alinhamento de potência dos equipamentos com a realidade local.



**Figura 37 – Localização das Estações Base no Entorno do Mineirão**  
Fonte: Radio Mobile / Base LandSat

### 3.4 Estrutura dos Sítios de Estações Base

De acordo com o dimensionamento sugerido para as estações base é possível dimensionar o abrigo necessário para receber os equipamentos da rede de rádio para a Copa de 2014. Neste estudo devem ser avaliados o sistema irradiante, a estrutura física, o sistema elétrico e aterramento, bem como o Centro de Coordenação e Controle de toda a rede. A Figura 38 apresenta a estrutura que será descrita neste tópico:



**Figura 38 – Modelo de Estrutura Básica para as Estações Base**

Fonte: <http://rf.com.br/content/componentes-de-rf#cabos>

Para tanto, foram propostos dois modelos de sítio para acomodação das estações base, sendo um para atendimento da célula principal do *cluster* com 16 rádios, e outros 6 secundários, com 2 rádios para as células adjacentes. Estas informações avalizam o dimensionamento do abrigo, que deverá atender estes dois modelos de sítios conforme descrição a seguir.

### 3.4.1 Sistema Irradiante

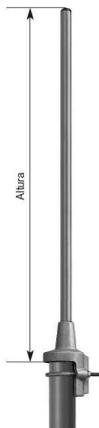
A Resolução 435/2006 da Anatel estabelece a canalização e as condições de uso de radiofrequências na faixa de 380 MHz por sistemas digitais do Serviço Limitado Móvel Privativo (SLMP) em aplicações de Segurança Pública. De acordo com os Artigos 8º e 9º desta norma, as estações fixas devem utilizar antenas diretivas e, as estações base, antenas com irradiação em setores maiores que 60°. Além disso, o Art. 18º do referido documento, também prevê a possibilidade de adoção de outros critérios para instalação da rede.

Considerando estas recomendações, com exceção às estações fixas, as estações base podem utilizar antenas omnidirecionais. Estas antenas possuem menor custo de instalação e possibilitam maior cobertura geográfica de uma determinada área. A desvantagem deste tipo de antena é a dificuldade de coordenação de frequências e a captação de interferência de células adjacentes. Contudo, devido à potência reduzida das estações base estas características não devem ser observadas de maneira crítica neste projeto (Rappaport, 1996).

Para atender estes requisitos, neste trabalho, são propostos dois tipos de antenas, sendo um para as estações base e outro para as estações fixas. As estações base devem utilizar antenas omnidirecionais com ganho de até 3 dB. Estas características são susceptíveis de modelagem com *Radio Mobile* e atendem o projeto proposto. Para as estações fixas, é proposta a antena Yagi com ganho de até de 3 dB. Ressalta-se ainda que esta antena também pode ser modelada pelo *Radio Mobile*. Estas antenas podem ser avaliadas na Figura 39, a seguir, e possuem custo médio de R\$ 500,00 e R\$ 1.200,00 respectivamente:

Omni 737 003: VPol 360° 370–430 2dBi  
 Omni K 75 11 21: VPol 360° 406–470 2dBi

Modelo	737 003	K 75 11 21
Faixa de Frequência	370 – 430 MHz	406 – 470 MHz
Polarização	Vertical	
Ganho	2 dBi	
Impedância	50 Ω	
VSWR	< 1.5	
Intermodulação IM3 (2 x 37 dBm portadoras)	< -150 dBc	
Potência máxima	100 W (50 °C em temperatura ambiente)	



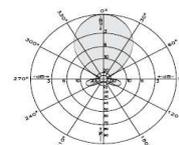
The Kathrein Scala Division CA5-300 five-element yagi antenna is intended for use in professional fixed-station applications in the 216–398 MHz band. It features:

- Balanced driven element for superior performance in icing conditions.
- Internal balun and dipole feedpoint sealed within the boom assembly.
- Heavy wall anodized aluminum pipe and tubing.
- Heavy aluminum castings and stainless steel hardware.
- Entire antenna at DC ground potential.

Specifications:	
Frequency range	216–398 MHz (specify frequency)
Gain	12 dBi
Impedance	50 ohms
VSWR	<1.3:1
Polarization	Horizontal or vertical
Front-to-back ratio	>18 dB
Maximum input power	100 watts
H-plane beamwidth	70 degrees (half-power)
E-plane beamwidth	52 degrees (half-power)
Connector	N female
Weight	9 lb (4.1 kg) (maximum)
Dimensions	52.8 x 26.8 inches (maximum) (1341 x 681 mm)
Equivalent flat plate area	0.85 ft <sup>2</sup> (0.079 m <sup>2</sup> ) (maximum)
Wind survival rating*	120 mph (200 kph)
Shipping dimensions	56 x 30 x 6 inches (maximum) (1422 x 762 x 152 mm)
Shipping weight	13 lb (5.9 kg)
Mounting	For masts of 2.375 inches (60 mm) OD.



(Shown vertically polarized)



\*Mechanical design is based on environmental conditions as stipulated in EIA-222-F (June 1996) and/or ETS 300 019-1-4 which include the static

**(a) Antena Omnidirecional**

**(b) Antena Diretiva**

**Figura 39 – Antenas para as Estações Base e Fixas**

Fonte: <http://www.kathrein.com.br/folhetos/>

As antenas devem estar dispostas em mastros ou torres. A altura destes pórticos depende de cada localidade. Considerando a necessidade de padronização para o projeto proposto neste trabalho são sugeridos dois modelos, sendo o primeiro, um mastro de 15 metros, e o segundo, uma torre de 30 metros, conforme observado na Figura 40. Estas estruturas possuem custo médio de R\$ 15.000,00 e R\$ 30.000,00 para instalação de mastro ou torre respectivamente:



**Figura 40 – Torre de Telecomunicação**

As estruturas das torres metálicas devem ainda seguir as exigências de padronização estabelecidas para o projeto, montagem, acabamento, inspeção e manutenção previstas pelos órgãos reguladores. Os principais parâmetros de especificação destas estruturas são: a capacidade de suportar as cargas previstas para as antenas e cabos; resistência ao deslocamento de massas de ar; fundação; escada de acesso; esteiras verticais e horizontais; plataformas de serviço; pára-raios; aterramento; iluminação de obstáculo e pintura.

Para interligar as antenas às estações base recomenda-se ainda a utilização de uma linha de transmissão que apresente pequena perda e baixo custo de instalação. O ideal neste projeto seriam guias de onda para a faixa de 380 MHz, no entanto, para esta faixa, não há disponibilidade comercial, o que poderia elevar o custo do projeto. Logo, para as estações fixas e base sugere-se o uso de cabos coaxiais tipo RGC213, pois na faixa de 380 MHz podem apresentar perdas de 0,42 dB a 1,26 dB com um custo médio de R\$ 5,00 a R\$ 7,00 por metro. Estes cabos podem ser observados na Figura 41 abaixo:

Componentes de RF: Cabos Coaxiais											1.12
Cabos Coaxiais 50 Ohms											
<b>DATALINK</b>											
Modelo	LMR 600	LMR 400	DLC 8 Premium	RGC 8	DLC 213 Premium	RGC 213	RG 213	RGC 58	RG 58	RF 174	
Fabricante	Datalink	Datalink	Datalink	Datalink	Datalink	Datalink	Datalink	Datalink	Datalink	Datalink	Datalink
Atenuação @ 100MHz dB/100m					4,2	4,2	6,6	10,0	15,6		
@ 850MHz dB/100m											
@ 900MHz dB/100m	8,2	12,8	13,8	13,7	13,7	14,0	24,6	33,7	57,0	83,3	
@ 2400MHz dB/100m	14,2	21,7	23,5	23,5	24,1	25,2	45,3	62,0	116,0	150,0	
@ 5800MHz dB/100m	23,8	33,8	39,2	39,2	41,2						
Conductor Central	Copper Clad Alumínio	Copper Clad Alumínio	Copper Clad Alumínio	Cobre	Copper Clad Alumínio	Cobre	Cobre	Cobre	Cobre	Cobre	Cobre
Velocidade de propagação %	87	85	84	84	82	82	87	82	80	68	
Capacitância pF/m	76,6	78,4	78	78	82	82	101	81	101	100	
Diâmetro externo mm	15,0	10,3	10,2	10,2	10,3	10,3	10,3	5,0	4,95	2,70	
Diâmetro condutor interno mm	4,47	2,74	2,74	2,74	2,61	2,61	2,25	1,08	0,90 (cabo)	0,48 (cabo)	
Raio Curvatura Mínimo mm	38,1	25,4	25,4	60	25,4	50	50	25	25	14	
Peso nódos kg	29,0	10,0	10,3	10,3	9,6	12,6	14,3	3,0	3,7	1,2	
Código	30597	30568	30509	30510	30511	10047	30512	10049	30513	10051	

**Figura 41 – Tabela de Cabos**

Fonte: <http://rf.com.br/content/componentes-de-rf#cabos>

Além disso, estes cabos necessitam ainda de conectores, os quais também podem apresentar algumas perdas, com valores típicos entre 0,5 dB e 1 dB. Os conectores de boa qualidade possuem custo médio entre R\$ 80,00 e R\$ 150,00. A Figura 42, a seguir, apresenta alguns conectores tipo N para uso nas estações deste projeto:



**Figura 42 – Modelo de Conectores**

Fonte: <http://rf.com.br/sites/rf.com.br/files/catalogs/catalog2009/0113.pdf>

Por fim, são necessários combinadores e multi-acopladores para as antenas que atendem as frequências de subida e descida para cada célula. Estes equipamentos custam cerca de R\$ 5.000,00 e suportam até 50 Watts contínuos. Trata-se de um importante recurso para a combinação de 8 a 16 estações base uma única antena. Em geral, possuem perdas de até 1dB e isolamento de até 60 dB entre as portas de saída. A Figura 43 apresenta um combinador multibanda, capaz de suportar uma faixa de RF de 40 a 960 MHz:

**Multiband Shorthaul  
Control Station Combiner**  
43-05-01 Series

BTC, TX, RX System brand multi-channel multi-band combiners provide frequency-agile operation across multiple bands. Interoperability can be combined into a single network for efficiency.

**PROBLEMS**

- Many bands on site with frequencies from VHF to 960 MHz
- Standardization across all sites
- Space constraints
- Cost reduction

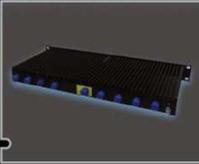
**SOLUTIONS**

- Multiband combiner allows operation in multiple bands
- Advance coupler technology with no need for tuning—control stations can be connected without regard to frequency
- Low Profile for space efficient installation
- Multiple bands can utilize the same combiner for cost reduction

**APPLICATIONS**

Control Station Combiners operating in multiple bands may be used to reduce the number of antennas required on a communications site while also ensuring that predictable radio-to-radio isolation is maintained at all times, irrespective of individual radio's Tx or Rx operating mode or antenna isolation characteristics.

Is ideally used with multiband coupler


**SPECIFICATIONS**

Frequency Range		40-960 MHz
Channel Capacity	43-05-01-08-SH	1-8 Channels
	43-05-01-16-SH	9-16 Channels
*Insertion Loss	43-05-01-08-SH	30.5 dB +/-1 dB typ. @ 380 MHz
		32.5 dB +/-1 dB typ. @ 960 MHz
	43-05-01-16-SH	34 dB +/-1 dB typ. @ 380 MHz
		36.5 dB max @ 960 MHz
<b>T/R Port-Port Isolation</b>		60 dB typ.
ANT Port -	43-05-01-08-SH	30 dB typ.
T/R Port Isolation	43-05-01-16-SH	34 dB typ.
T/R Port Return Loss		>20 dB
ANT Port Return Loss		>14 dB
Power Rating		Up to 50watts continuous
Duty Cycle		See Note Below
		20% @ 50watts continuous on all ports
		40% @ 25watts continuous on all ports
		100% @ 10watts continuous on all ports
Temperature		-30 to +60 °C
RF Connectors		N (female)
Size	43-05-01-08-SH	19 x 1.75 x 8 in / 483 x 44.75 x 203 mm
	43-05-01-16-SH	19 x 3.5 x 8 in / 483 x 89.5 x 203 mm
		(Note: Not including connectors)
Grounding		M6 Grounding Stud
Weight		13.2 lbs / 6 kgs typ.

**Figura 43 – Combinador Multibanda**

Fonte: <http://www.bird-technologies.com/products/datasheets/combiners/MultiBandSCSC.pdf>

Considerando os equipamentos e materiais descritos acima, bem como o custeio com os serviços de instalação da torre, antenas, linha de transmissão e combinadores, os sítios da estação base e fixa podem apresentar as características descritas conforme a Tabela 12 a seguir:

**Tabela 12 – Características dos Componentes da Linha de Transmissão e Sistema Irradiante**

Sítio	Equipamento/Material	Ganho/Perda (dB)	Custo
Estação Base	Antena Omnidirecional	3	R\$ 1.000,00
	Torre 30 m	0	R\$ 30.000,00
	Conectores	4	R\$ 600,00
	Cabo RGC 213	1,5	R\$ 300,00
	Combinador/Multiacoplador/Filtros	1	R\$ 25.000,00
	<b>Total</b>		

**Continuação da Tabela 12 – Características dos Componentes da Linha de Transmissão e Sistema Irradiante**

<b>Sítio</b>	<b>Equipamento/Material</b>	<b>Ganho/Perda (dB)</b>	<b>Custo</b>
Estação Fixa	Antena Yagi	3	R\$ 1.200,00
	Mastro 15m	0	R\$ 15.000,00
	Conectores	4	R\$ 600,00
	Cabo RGC 213	0,75	R\$ 180,00
	<b>Total</b>		

Fonte: Adaptado das páginas de internet dos fabricantes em 16/08/10.

Algumas estações fixas podem utilizar a estrutura física das edificações e poupar o custo com a instalação de um mastro ou torre metálica. Este tipo de recurso é conhecido como “*rooftop*” e pode ser utilizado neste projeto.



**Figura 44 – “*Rofftop*” - Antenas Sobre a Edificação**

### 3.4.2 Abrigos

Os abrigos devem ser capazes de receber as estações base das células principais e adjacentes, sendo estas caracterizadas por 16 e 2 duas estações base respectivamente. Portanto, duas estruturas distintas são necessárias para atender esta demanda. Para as células principais, são necessários abrigos que comportem um bastidor com 16 rádios, combinador/multiacoplador, sistema de alimentação principal e reserva, bem como demais acessórios. Para tanto, neste projeto recomenda-se a adoção de duas estruturas, sendo um contêiner para suprir as estações base principais, e um armário, para atender as células adjacentes com 2 rádios. Estas estruturas podem ser observadas na Figura 45 a seguir:



**(a) Contêiner**



**(b) Armário**

**Figura 45 – Shelter/Abrigo para Estações Base**  
**Fonte: <http://www.kalai-industries.com>**

Em ambos os casos, é necessário prever o controle da temperatura ambiente por meio de um sistema de climatização automatizado. Também se faz necessário um sistema de monitoramento, supervisão e alarme remoto, bem como controle de acesso ao sistema.

O material de fabricação destas estruturas deve oferecer proteção contra incêndio e resistência suficiente contra a ação de intempéries, tempestades, pragas, insetos e demais danos que possam ser causados pela ação da natureza e do homem. O contêiner e armário de telecomunicações com essas características possuem custo médio de instalação entre R\$ 50.000,00 e R\$ 5.000,00 respectivamente.

### **3.4.3 Sistema Elétrico**

Os sistemas elétricos dos abrigos dos sítios principal e adjacentes são semelhantes e por isso podem ser descritos em conjunto. Para tanto, ressalta-se a conexão principal com a rede elétrica pública e os sistemas de alimentação reservas. A conexão com a rede elétrica pública deve prover a alimentação principal do sistema e ser capaz de atender a demanda de energia na potência máxima de todas as estações base operando simultaneamente. Isso significa dizer que, a rede pública deve ser suficiente para manter 16 estações base transmitindo com até 25 Watts, além dos sistemas de condicionamento térmico do abrigo, monitoramento remoto, carga do sistema reserva e demais acessórios previstos.

Para análise desta demanda, a Tabela 13 apresenta um resumo das características da carga total do abrigo principal e adjacente:

**Tabela 13 – Características de Carga dos Abrigos Principal e Adjacente**

<b>Sítio</b>	<b>Equipamento/Material</b>	<b>Carga (W)</b>
Abrigo Principal	Estações Base	600

**Continuação da Tabela 13 – Características de Carga dos Abrigos Principal e Adjacente**

<b>Sítio</b>	<b>Equipamento/Material</b>	<b>Carga (W)</b>
Abrigo Principal	Controladores (MSC)	100
	Enlace de Micro-ondas	250
	Multiplexador	150
	Iluminação	250
	Alarmes e Sistema de Vigilância	150
	Controle Térmico	250
	Acessórios Auxiliares	50
	<b>Total</b>	<b>1.800</b>
Abrigo Adjacente	Estações Base	200
	Controladores (MSC)	50
	Enlace de Micro-ondas	250
	Multiplexador	150
	Iluminação	50
	Alarmes e Sistema de Vigilância	150
	Controle Térmico	100
	Acessórios Auxiliares	50
	<b>Total</b>	<b>1.000</b>

Fonte: Adaptado das páginas de internet dos fabricantes em 16/08/10.

Por sua vez, os sistemas reservas devem permitir a utilização do sistema de transmissão em, pelo menos, 60% de sua capacidade de potência. Isso significa dizer que, durante as panes do sistema elétrico da rede pública, os sistemas reservas devem permitir a utilização das estações base com até 60% de

sua potência durante tempo suficiente para restaurar a energia do sistema principal ou acionamento da equipe de manutenção para reparo.

Os sistemas reservas são compostos de banco de baterias de 48 volts e grupo gerador para os sítios principais, e para os sítios adjacentes, banco de baterias 48 volts são suficientes para atender a demanda de 2 rádios base. No caso do banco de baterias, observado na Figura 46 (a), a potência mínima desejável é 1.200 Watts, ou seja, cerca de 60% da carga do abrigo principal com uma pequena margem de segurança. No caso do grupo gerador, Figura 46 (b), o dimensionamento deve considerar ainda os valores comerciais encontrados no mercado, que fiquem em torno de 1800 Watts.



**(a) Banco de Baterias**



**(b) Gerador**

**Figura 46 – Sistemas de Energia Reserva**

Fonte: <http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Energia/>

Em ambos os sistemas, operando isoladamente ou em conjunto, se faz necessário um sistema remoto de monitoramento e supervisão, os quais permitem o acompanhamento a distância do funcionamento dos abrigos. Estes sistemas possuem valores em torno de R\$ 10.000,00 para a instalação do banco de baterias, e R\$ 40.000,00 para grupos geradores com essas características.

Além disso, o sistema elétrico do abrigo deve utilizar um sistema de

aterramento que contemple a proteção contra surtos oriundos da rede pública ou descargas atmosféricas captadas pelo sistema irradiante do sítio.

Para proteção contra as descargas atmosféricas captadas pelo sistema irradiante recomenda-se a utilização de centelhadores de RF. Estes protetores possuem custo médio de R\$ 300,00 e podem proteger os rádios base contra sobre cargas na linha de transmissão – Figura 47 (a). No quadro elétrico principal recomenda-se a instalação de protetores elétricos conforme observado na Figura 47 (b):



**(a) Centelhador de RF**



**(b) Protetor Elétrico**

**Figura 47 – Protetores Elétricos**

Fonte: <http://www.clamper.com.br/>

Além da utilização de protetores elétricos e centelhadores de RF, também se faz necessária implantação de uma malha de aterramento que permita escoar as descargas atmosféricas no sistema irradiante e surtos oriundos da rede elétrica, bem como aterrar e equalizar toda a estrutura metálica do sítio. A instalação desta malha de aterramento na estrutura da torre e abrigo tem valor aproximado de cerca de R\$ 5.000,00 para instalação nos sítios principais. A Figura 48 apresenta alguns itens que compõe um kit para instalação de uma malha de aterramento que pode atender a demanda deste projeto:



**Figura 48 – Kit para Montagem da Malha de Aterramento**

Fonte: <http://www.clamper.com.br/>

### 3.5 Centro de Coordenação e Controle

O Centro de Coordenação e Controle (CCC) é o local onde deve ser instalada a infraestrutura de suporte para a rede de rádio, bem como o acesso para as consoles de despacho das cabines de coordenação do policiamento durante a Copa de 2014. No CCC, a infraestrutura da rede é gerenciada por um Controlador da Rede de Rádio (RNC – sigla em inglês) que exerce a centralização do controle e supervisão de todas as estações móveis da rede por meio da gestão das Controladoras de Roteamento dos Móveis (MSC – sigla em inglês).

Este processo pode ser avaliado na Figura 49, onde as MSC são interligadas em todos os sítios por um *gateway* de Gerenciamento e Roteamento da Infraestrutura (SwMI – sigla em inglês). Este *gateway* pode utilizar fibra óptica ou rádio de micro-ondas como meio de transmissão. Neste projeto recomenda-se a utilização de rádios de micro-ondas devido o elevado custo de lançamento de fibras. O equipamento de *gateway* pode ser avaliado na Figura 49:



**Figura 49 – Estrutura do Gateway TETRA**  
 Fonte: <http://www.thalescomminc.com/> e <http://www.alvarion.com.br/>

A solução de *gateway* para interligação dos sítios por enlaces de micro-ondas depende da localização e distância entre as estações. Outro aspecto importante neste dimensionamento é a taxa de dados necessária para escoamento dos *frames* de dados TDMA/TETRA.

De acordo com a recomendação ETSI EN 300.392-2, v.2.5.2/2005, uma estação base recebe 2040 bits a cada 56,67 ms pela *interface* aérea, em um *frame* de dados TETRA contendo dados de voz de 4 estações móveis modulados a uma taxa de até 28,8 kbps. Caso seja necessário, esses bits devem ser encaminhados pelo SwMI para outras células da rede. De acordo com essa informação, o tráfego na interface aérea da célula principal do *cluster* deve ser de 32.640 bits em 56,67 ms, isto é, 2040 bits para cada uma das 16 estações base controladas. Para escoar estes bits a estação base entrega à rede de dados 575.966 kbps (32.640 bits em 56,67 ms) que são demodulados a uma taxa de até 28,8 kbps por estação.

Portanto, no sítio principal, as 16 estações base podem processar os dados de voz de até 64 estações móveis operando simultaneamente a uma taxa de 28,8 kbps. Esta taxa exige uma rede de dados no *gateway* que possa escoar, pelo menos, 1.843.200 bits por segundo.

Além desses dados oriundos dos móveis, a rede do *gateway* deve transportar ainda dados de controle do sítio, permitindo que o RNC processe as informações necessárias para o SwMI. De acordo com Ketterling (2004) e Stavroulakis (2007), enlaces de dados para sítios TETRA devem possuir capacidade de, pelo menos, 2 Mbps.

No entanto, o *gateway* com essa dimensão não atenderia o sítio principal deste projeto com uma margem de segurança razoável. Neste caso, sugere-se um enlace que possa suportar 4 Mbps, com o custo médio de até R\$ 150.000,00 de instalação, aproveitando-se a infraestrutura de cada sítio.

No CCC também estão instalados os bancos de dados de gerenciamento dos perfis das estações fixas e móveis, como Banco de Dados Local (HDB – sigla em inglês) e Banco de Dados de Visitantes (HDV – sigla em inglês) que são controlados pelo RNC TETRA. Neste local também são instalados os equipamentos de Registro Local e de Visitantes dos Móveis (HLR/VLR – siglas em inglês). A Figura 50 apresenta um exemplo de CCC, o qual foi instalado em 2008 para os Jogos Olímpicos de Beijing, na China:



**Figura 50 – Centro de Coordenação e Controle**  
Fonte: [http://www.bestaudio.com/2008\\_Beijing\\_olympics.htm](http://www.bestaudio.com/2008_Beijing_olympics.htm)

Por fim, as estações despacho também devem estar próximas ao CCC, uma vez que esta precaução poderá poupar investimentos de interconexão. As estações de despacho são responsáveis pela coordenação do policiamento externo durante a Copa de 2014 e devem estar instaladas em um Centro de Comunicações Policiais (COPOM). Estas estações possuem custo médio de R\$ 15.000,00 e são compostas de um microcomputador, *software* de gerenciamento e infraestrutura de rede. A Figura 51 apresenta um modelo de estação de despacho:



**Figura 51 – Estação de Despacho de Rádio**  
Fonte: <http://dps.montcopa.org/>

A estrutura de um Centro de Coordenação e Controle tem custo médio de R\$ 15.000.000,00 para instalação de infraestrutura para 25 consoles de despacho e recursos de gerenciamento e supervisão da rede TETRA.

## Capítulo 4

### Considerações Finais

Para consolidação do projeto proposto, a Tabela 13, a seguir, apresenta os valores estimados para o investimento no Projeto da Rede de Rádio Digital para Segurança Pública em Belo Horizonte na Copa do Mundo de Futebol de 2014.

**Tabela 13 – Total do Investimento no Projeto**

Item	Equipamento/Material	Quantidade	Valor (R\$)
Estação Base Principal	Rádios/Controladora	13	R\$ 1.040.000,00
	Sistema Irradiante		R\$ 728.000,00
	Abrigo - Contêiner		R\$ 750.000,00
	Sistema Elétrico e Aterramento		R\$ 750.000,00
	Gateway		R\$ 1.950.000,00
	<i>Sub-Total</i>		
Estação Base Adjacente	Rádios/Controladora	78	R\$ 780.000,00
	Sistema Irradiante		R\$ 1.324.440,00
	Abrigo - Armário		R\$ 390.000,00
	Sistema Elétrico e Aterramento		R\$ 1.170.000,00
	Gateway		R\$ 5.840.000,00
	<i>Sub-Total</i>		
Centro de Coordenação e Controle	Estações de Despacho, Infraestrutura e Servidores de Rede	1	R\$ 15.000.000,00
	<i>Sub-Total</i>		
Estações Móveis/Fixas	Portáteis	3.000	R\$ 10.500.000,00
	Veiculares	2.500	R\$ 12.500.000,00
	Fixas	500	R\$ 2.500.000,00
	<i>Sub-Total</i>		
<b>Total do Investimento</b>			<b>R\$ 55.222.440,00</b>

Fonte: Valores obtidos em preços fornecidos pelos fabricantes em consulta à *internet*.

Trata-se de um projeto audacioso, que exigirá do administrador público atenção para confecção do Edital do processo licitatório, bem como eficiência da empresa contratada para execução do projeto. Ressalta-se ainda que os valores estimados possam ser reduzidos caso seja adotado um processo de aquisição de equipamentos na modalidade de Pregão Internacional, onde as empresas interessadas, de todo o mundo, poderão participar do certame ofertando lances com valores decrescentes pelo direito de fornecimento dos equipamentos e materiais.

Outro aspecto importante também está relacionado com a implantação dos sítios e o licenciamento e coordenação das freqüências na faixa de 380 MHz, uma vez que o projeto em execução depende da outorga da Anatel e órgãos reguladores do meio ambiente. Assim, dependendo do tempo para o trâmite burocrático, poderá impactar nos custos e prazos para conclusão do projeto. Logo, recomenda-se que a empresa fornecedora seja responsável pela confecção da documentação técnica necessária para o licenciamento, de maneira que ela seja responsabilizada pelo cumprimento do cronograma proposto para execução do projeto caso ocorra algum indeferimento pelos órgãos reguladores.

Por fim, os investimentos em Segurança Pública são fundamentais para o sucesso da Copa do Mundo de Futebol em Belo Horizonte, pois a realização deste evento na capital mineira será responsável pela projeção da cidade em âmbito mundial. Portanto, nada mais justo que os encarregados de aplicação da lei da cidade utilizem equipamentos modernos e capazes de suprir as comunicações neste importante evento internacional.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**AGÊNCIA MINAS** - *Polícia Militar começa em todo o Estado a Operação Natalina.*

Disponível em <<http://www.agenciaminas.mg.gov.br>> Acesso em 28/12/2009.

**ALFAYEZ**, Adel & **HATFIELD**, Dale. *Evaluating the Viability of TETRA for US Public Safety Communication.* Boulder: Universidade do Colorado, 2009.

**ALOTAIB**, Faihn D. **ALI**, Adel A. *TETRA Outdoor Large- Scale Received Signal Prediction Model in Riyadh Urban Area.* In: IEEE Wireless and Microwave Technology Conference, Dezembro 4-5. Clearwater: IEEE/WMTC, 2006.

**ANASTASIA**, Antônio Augusto. *Apresentação das ações e projetos do Governo Estadual - Coordenador do Núcleo Gestor das Copas no Seminário FDC/BDMG 2009.* Disponível em [http://www.fdc.org.br/hotsites/mail/bh\\_copa\\_2014/apresentacao\\_anastasia.pdf](http://www.fdc.org.br/hotsites/mail/bh_copa_2014/apresentacao_anastasia.pdf) Acesso em 10 de março de 2010.

**ANATEL**, Agência Nacional de Telecomunicações. Ato Administrativo n.º 66.150, de 24 de julho de 2007 – *Autorização Temporária do Espectro de 400 MHz para a PMRJ no período de 25 julho de 2007 à 07 de setembro de 2007.*

**BARRETTO FILHO**, Luiz Eduardo P. *Relatório Final de Benchmarking em turismo: aprendendo as melhores experiências internacionais 2008/2009 – Copa do Mundo da Alemanha 2006.* Brasília: Ministério do Turismo / Secretaria de Políticas de Turismo, 2009, 93p.

**CHENNAKESHU**, Sandeep. **SAULNIER**, Gary. *Detecção Diferencial de  $\pi/4$ DQPSK para Rádio Celular Digital.* In: IEEE – Transições sobre Tecnologia Veicular, v. 42, n.1. Washington: IEEE, 1993.

**FERREIRA**, Carlos Alberto A. **GRASSI**, Marcelo G. *O apoio de comunicações no escalão brigada de ataque em áreas urbanas*. Rio de Janeiro: EC-EMEB/EMCB, 2008, 15p.

**FIFA**. Federação Internacional das Associações de Futebol – sigla em francês. *Calendário Internacional*. Disponível em <http://pt.fifa.com/mm/document/worldfootball/calendar&live/51/52/61/international-mc-fifa-dates-2010-2014-updatejune2010-e.pdf> Acesso em 15/09/10.

**GENRO**, Tarso. *Revista Pan Rio-2007: Ações de Convivência e Segurança para os XV Jogos Pan-Americanos Rio-2007*. Brasília: MJ/SENASP, 2007.

**HARTE**, Lawrence. *Introduction to paging systems: one-way, two-way, POCSAG, ERMES, FLEX, REFLEX & INFLEXION*. Nova York, ATHOS, 2003.

\_\_\_\_\_, Lawrence. *Introduction to Private Land Mobile Radio: Dispatch, LTR, APCO, MPT1327, iDEN, and TETRA*. Nova York, ATHOS, 2004.

**ITU – União Internacional de Telecomunicações** – sigla em inglês. *Relatório M.2014 – Eficiência do Espectro para tráfego de rádio digital - (Question ITU-R 37/8)*. Genebra: ITU, 1998.

**JONES**, Robert W. *Handbook Spectrum Monitoring*. Genebra: ITU/RR, 2002

**KETTERLING**, Hans-Peter A. *Introduction a digital professional mobile radio*. London: Artech, 2004.

**LACERDA**, Márcio. *Apresentação das ações e projetos da Prefeitura de Belo Horizonte - Coordenador Núcleo da Copa no Seminário FDC/BDMG 2009*. Disponível em [http://www.fdc.org.br/hotsites/mail/bh\\_copa\\_2014/marcio\\_lacerda.pdf](http://www.fdc.org.br/hotsites/mail/bh_copa_2014/marcio_lacerda.pdf) Acesso em 10 de março de 2010.

**LONGLEY, A. G.** *Radio Propagação em Áreas Urbanas*. Washington: Departamento de Comércio, 1982.

**MANNER, Jennifer A.** *Guerra do Espectro: o debate da política e tecnologia*. Londres: Artech, 2003.

**MIRANDA, E. E. de;** (Coord.). *Brasil em Relevô. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005*. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 30 jul. 2010.

**MOLINARO, Luis F. Ramos.** *Sistemas Integrados de Comunicação Crítica*. Brasília: UnB/LabTec, 2005, 358p.

**MORRIS, Edwin et.al.** *System of Systems Interoperability (SOSI) Final Report ESC-TR-2004-004*. Pittsburgh: Instituto de Engenharia de Software Carnegie Mellon, 2004.

**MIYOSHI, Edson Mitisugo.** *Projetos de sistemas de rádio*. São Paulo: Editora Érica, 2002, 535p.

**NTIA** (Agência Nacional de Telecomunicação e Informação norte-americana). *Transition of Federal Land Mobile Radio Systems to Increase Spectrum Efficiency – Final Report*. Washington: NTIA, 2008.

**PRASAD, K.V.** *Principles of digital communications system and computer networks*. Massachusetts: Charles Rivers, 2004.

**RAPPAPORT, T.** *Comunicações Sem Fio: Princípios e Prática*. São Paulo: Prentice Hall, 1996.

**REDL**, Siegmund M. *GSM and Personal Communications Handbook*. Londres: Artech House, 1998, 539p.

**RRMAG, RadioResource**. *Uma Rede Olímpica* In: Revista RadioResource n.º 2, vol. 22 / 2008 - Disponível em <http://www.radioresourcemag.com> Acesso em 15 de março de 2010.

**SHAO**, Qin (org). *Analysis of Public Safety Traffic on Trunked Land Mobile Radio Systems*. In: IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 22, Nº. 7, 2004. Washington: IEEE, 2004.

**STAVROULAKIS**, Peter. *Terrestrial Trunked Radio – TETRA: A Global Security Tool*. Nova York: Springer, 2007.

**TOIKKANEN**, Risto. *Understanding TETRA Security*. In: Conference TETRA Today. Buenos Aires: ETSI, 2007.

**TOSKALA**, Antti (Org.) *WCDMA para UMTS: Acesso de Rádio para a 3ª geração de comunicações móveis*. Londres: John 2004.

**WEBB**, William. *The complete Wireless Communications Professional: a guide for engineers and managers*. Londres: Artech House, 1999, 402p.