

SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO MÓVEL DIGITAL: UM
EXEMPLO DE APLICAÇÃO EM TELEMEDICINA

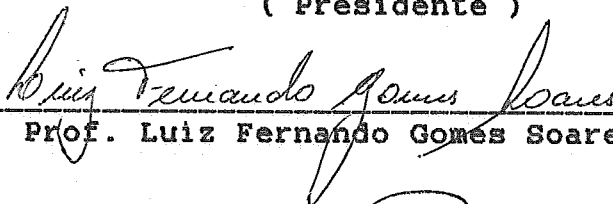
Luis Fernando Fernandes Pimentel

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS
DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO
DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE
SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:



Prof. Gelson Vieira Mendonça, Ph.D.
(Presidente)



Prof. Luiz Fernando Gomes Soares, D.Sc.



Prof. Aloysio de Castro Pinto Pedroza, D.Sc.



Prof. Antonio Fernando Catelli Infantosi, Ph.D.

PIMENTEL, LUÍS FERNANDO FERNANDES

Sistemas de Comunicação Móvel Digital: um Exemplo de
Aplicação em Telemedicina [Rio de Janeiro] - 1990

XIII, 176 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia de
Sistemas, 1990)

Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Sistemas de Comunicação Móvel Digital

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

A minha esposa Mônica e aos
meus filhos Felipe e Erika.

Agradeço à todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para o sucesso deste trabalho, em especial aos meus orientadores, Gerhard Schwarz e Gelson Vieira Mendonça.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em ciências (M.Sc.).

**SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO MÓVEL DIGITAL: UM
EXEMPLO DE APLICAÇÃO EM TELEMEDICINA**

Luis Fernando Fernandes Pimentel

abril, 1990

Orientador: Gelson Vieira Mendonça

Programa : Engenharia de Sistemas e Computação

Neste trabalho é realizado o projeto de um sistema de comunicação móvel digital de telemedicina , cujo objetivo maior é a manutenção de altos níveis de confiabilidade e disponibilidade para o canal de comunicação, o que permite sua aplicação em serviços de telemedicina.

Desse modo, a rede proposta pretende situar os efeitos de ruídos e interferências à níveis mínimos. Para a obtenção de um comprimento máximo para o enlace de comunicação são sugeridas técnicas que permitem lidar com os efeitos de obstáculos e de variações no canal devidas aos multipercursos dos sinais. São também propostos o formato dos dados digitais, os protocolos de comunicação e o método de modulação digital, com a apresentação de técnicas alternativas que podem permitir a obtenção de um melhor desempenho, se necessário.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.).

**DIGITAL MOBILE COMMUNICATION SYSTEMS: A TELEMEDICINE
APPLICATION EXAMPLE**

Luis Fernando Fernandes Pimentel

april, 1990

Thesis supervisor: Gelson Vieira Mendonça

Department : Engenharia de Sistemas e Computação

This thesis is concerned with a mobile digital communication system, which main purpose is the maintenance of high reliability and availability levels for the communication channel, allowing its application in telemedicine services.

Thus, the proposed network was designed to fix the effect of impairments such as noise and interference at very low levels. Maximum ranges may be covered as techniques are suggested to deal with the obstacles and the variable multipath nature of the channel. In addition, are proposed in the work the format of digital data, protocols of communication and the digital modulation method, with the presentation of alternative techniques that enable a better performance, if necessary.

INDICE

INDICE DE FIGURAS	xi
INDICE DE TABELAS	xiii
CAPITULO I - Introdução	1
I.1 - Sistemas móveis digitais em telemedicina .	1
I.2 - Plano de tese	2
CAPITULO II - Características de aplicações em telemedicina	4
II.1 - Confiabilidade da comunicação	4
II.1.1 - Interferência entre canais adjacentes (intermodulação)	5
II.1.2 - Interferência co-canal	6
II.1.3 - Ruído eletromagnético	7
II.2 - Disponibilidade do equipamento e do canal de comunicação	8
II.2.1 - Atenuação do sinal	9
II.2.1.1 - Atenuação devida à propagação de espaço livre	9
II.2.1.2 - Atenuação devida à propagação de terra plana	10
II.2.1.3 - Atenuação por sombras	11
II.2.1.4 - Atenuação por multicaminhos de propaga- ção	13
II.2.2 - Modelos estatísticos	14
II.3 - Tempo de transferência da informação	17

CAPÍTULO III - Modelagem do sistema	20
III.1 - Definição de contornos	22
III.2 - Parâmetros de cobertura e de usuário	25
III.2.1 - Número de usuários	26
III.2.2 - Natureza da informação	26
III.2.3 - Qualidade da apresentação	37
III.3 - Características operacionais e econômi- cas	40
III.3.1 - Tamanho do equipamento, potência dispo- nível e eficiência na transmissão	41
III.3.2 - Robustez	42
III.3.3 - Tolerância à falhas	43
III.3.4 - Receptividade	44
III.3.5 - Facilidade de operação e manutenção	45
III.3.6 - Custos e benefícios	45
III.3.6.1 - Custos de projeto	46
III.3.6.2 - Custos de implantação	46
III.3.6.3 - Custos de operação	47
III.3.6.4 - Custos de manutenção	48
 CAPÍTULO IV - Projeto do sistema	 49
IV.1 - Níveis de confiabilidade	49
IV.2 - Frequência de operação	52
IV.3 - Método de modulação	57
IV.3.1 - Modulação baseada em FSK	58
IV.3.2 - Modulação baseada em PSK	60
IV.3.3 - Avaliação	61
IV.4 - Método de detecção	72

IV.5	- Método de acesso	74
IV.5.1	- Métodos clássicos	75
IV.5.2	- Métodos de contenção	77
IV.5.3	- Métodos com reservação	79
IV.5.4	- Métodos de escuta	80
IV.5.5	- Avaliação	84
IV.6	- Formato de transmissão e tamanho dos pacotes	89
IV.7	- Taxa de transferência	94
IV.8	- Nível de sinal requerido na recepção	95
IV.9	- Comprimento dos enlaces	106
IV.10	- Localização das estações	111
IV.10.1	- Sistemas celulares	112
IV.10.2	- Definição do sistema celular	115
IV.10.3	- Atribuição dos canais e controle das conexões	121
IV.10.4	- Distribuição geográfica	124
CAPÍTULO V - Análise		133
V.1	- Avaliação	133
V.2	- Sistemas digitais versus sistemas analógicos	138
V.3	- Técnicas auxiliares	141
V.3.1	- Controle de erros	142
V.3.1.1	- Correção de erros	143
V.3.1.1.1	- Códigos de bloco BCH (BOSE - CHAUDHURI - HOCQUENGHEN)	144
V.3.1.1.2	- Códigos convolucionais	145
V.3.1.1.3	- Códigos mistos	146

v.3.1.2	- Retransmissão	147
v.3.1.2.1	- Retransmissão SAW (Stop-And-Wait)	147
v.3.1.2.2	- Retransmissão contínua	148
v.3.1.2.3	- Retransmissão seletiva	148
v.3.1.3	- Modelos Híbridos	149
v.3.1.4	- Avaliação	150
v.3.2	- Diversificação	155
v.3.3	- Topologias alternativas	158
v.3.4	- Dilatação de espectro	160
v.3.4.1	- Técnicas de dilatação	162
v.3.4.2	- Geração de seqüências pseudo - randômicas	164
v.3.4.3	- Sincronismo	165
v.3.4.4	- Avaliação	166
CAPÍTULO VI - Conclusões		167
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		171

INDICE DE FIGURAS

II.1 - Distribuição estimada de atenuação por interposição de estruturas	12
II.2 - Características típicas de atenuação por multicaminhos em distâncias de 30 a 40 milhas	14
III.1- MOS x taxa média de erros (BER) para várias condições e codificadores em canais de rádio móvel	33
IV.1 - Comparação da probabilidade de erros para vários métodos de sinalização digital	65
IV.2 - Comparação de desempenho de recepção ótima para FSK em canais com e sem incidência de atenuação por multicaminhos	67
IV.3 - Vazão para métodos de acesso randômico (atraso de propagação $\alpha = 0,01$)	81
IV.4 - Estrutura de um quadro HDLC	90
IV.5 - Estrutura de um quadro EEA	91
IV.6 - Tamanho ótimo de um pacote versus tamanho médio da mensagem	93
IV.7 - Fa versus freqüência na faixa de 10^8 a 10^{11} Hz ...	101
IV.8 - Fator de correção por irregularidades do terreno .	104
IV.9 - Sistema celular de comunicação com três grupos de canais	113

IV.10 - Distribuição das células pelo município	130
V.1 - Inverso da eficiência de transmissão a velocidades de 20 mi/h com atenuação devida a multicaminhos ..	154
V.2 - Alguns padrões de disposição de antenas numa célula	160

INDICE DE TABELAS

III.1- Número de ambulâncias em operação no serviço público municipal do Rio de Janeiro	23
III.2- Características dos sinais envolvidos em aplicações de telemedicina	30
III.3- Taxas de geração de dados para os sinais analógicos envolvidos no sistema	31
III.4- Taxas de transferência associadas aos sinais considerados	37
III.5- Referências de qualidade para os níveis em escala MOS	38
III.6- Escala de graduação TASO	40
IV.1 - Comparação de métodos de sinalização digital	64
IV.2 - Tolerância a ruídos de sinais binários	68
IV.3 - Tolerância a ruídos de vários sinais com envelope constante	69
V.1 - Comparação do desempenho de técnicas de controle de erros por simulação	152

CAPÍTULO I

Introdução

I.1 - Sistemas móveis digitais em telemedicina

Com a evolução dos sistemas digitais para transmissão de dados, foram surgindo inúmeras aplicações dos mesmos em diversas áreas de conhecimento e para diversos fins, na forma de serviços privados ou públicos. Uma das aplicações a se destacar pelo seu cunho social relevante é a transferência de informações de/para veículos na prestação de serviços médicos assistenciais e emergenciais, que tem como objetivos principais [40]:

- . tornar disponíveis recursos médicos complexos em regiões carentes, através do acesso à distância a médicos especialistas, equipamentos sofisticados e informações contidas em bancos de dados centralizados;
- . possibilitar maior rapidez e acurácia de diagnósticos em casos de urgência através de acessos aos recursos mencionados, mesmo durante o transporte de pacientes para uma unidade central;
- . tornar mais viável a aplicação de medicina preventiva em regiões carentes.

Entretanto, tal tipo de serviço acarreta a elevação do nível de qualidade e confiança das conexões entre estações de forma a evitar erros e falhas que possam incorrer em risco de saúde para um paciente. Para isso, a modelagem do sistema

deve considerar técnicas que permitam a obtenção de um serviço otimizado e confiável.

Dessa forma , o presente trabalho se propõe a delimitar os contornos de um sistema móvel digital de comunicação voltado para aplicações de atendimento médico em viaturas e deslocamento de pacientes na região do município do Rio de Janeiro, onde o enfoque principal é a manutenção de um alto nível de confiabilidade para os enlaces estabelecidos entre estações móveis e fixas. Paralelamente, a metodologia de projeto adotada se propõe a ser um padrão pela sua simplicidade, além de que as informações e conclusões obtidas durante este processo procuram ser detalhadas a um nível tal que possibilite sua utilização na definição de outros sistemas, voltados ou não para este tipo de aplicação.

I.2 - Plano de tese

Seguindo o plano de apresentação de tese adotado, são apresentadas no capítulo II as principais limitações encontradas para aplicações que envolvem a transferência de informações para / de estações móveis através de enlaces de rádio, além das características desejáveis quando as informações envolvidas exigem um controle permanente do nível de confiabilidade dos canais de comunicação.

No capítulo III são apresentados os principais parâmetros a serem considerados na modelagem de um sistema de telemedicina. Estes dados possibilitam a definição, no capítulo IV, dos valores de projeto essenciais à adequação do sistema ao

desempenho das funções a que ele se propõe , delimitando-se assim seus contornos dentro do ambiente considerado.

O capítulo V apresenta uma análise crítica do desempenho esperado do sistema e de sua aplicabilidade, sendo relacionadas também algumas técnicas que podem auxiliar na elevação do nível de serviço oferecido, caso tal incremento seja considerado necessário. Aproveitando-se também o espaço para discussões criadas pelas recentes determinações da Empresa Brasileira de Telecomunicações no sentido de promover a implantação de sistemas de telefonia móvel em algumas das capitais do país , procuraremos oferecer uma breve avaliação da aplicabilidade dos conceitos de comunicação analógica e digital como soluções para a construção de tais sistemas, direcionando tal avaliação no sentido de se encontrar a melhor opção no contexto da realidade nacional.

Finalmente , no capítulo VI são apresentadas as considerações finais do trabalho.

CAPÍTULO II

Características de aplicações em telemedicina

Para que possa ser estabelecida uma alta qualidade de serviço para os usuários de um sistema de comunicação, devem ser identificadas de forma correta todas as características desejáveis à melhoria de seu nível de serviço. Torna-se então possível a adoção de soluções otimizadas no decorrer do projeto, que procurem explorar da forma mais adequada todas as facilidades tecnológicas atualmente disponíveis.

Nos próximos itens procuraremos então relacionar os principais parâmetros a serem considerados na implantação de um sistema cujo objetivo principal é garantir a integridade e a eficiência na transferência das informações entre seus elementos componentes, bem como representar tais parâmetros por limites quantitativos e apresentar as técnicas disponíveis para a aproximação de valores reais a estes limites.

II.1 - Confiabilidade da comunicação

A transmissão de informações médicas por qualquer meio de comunicação deve ser realizada de modo a preservar a integridade das mesmas, estabelecendo-se assim níveis de confiabilidade para as mensagens cuja manutenção é vital para a realização do acompanhamento médico à distância. Estes níveis são mantidos através de projeto e utilização adequados dos canais de comunicação e, se os resultados não forem satisfatórios, torna-se necessária a utilização de técnicas de controle de erros no sistema.

Podemos identificar como principal fator de influência na determinação de nível de erros de um canal de comunicação as interferências sofridas por um sinal trafegando neste canal durante seu percurso através dos diferentes caminhos de propagação existentes. Dentre as classes de interferência de maior atuação neste tipo de comunicação, podemos destacar três principais: a intermodulação, devida principalmente à interferência entre canais adjacentes, a interferência co-canal e os ruídos eletromagnéticos.

II.1.1 - Interferência entre canais adjacentes (intermodulação)

E ocasionada principalmente pela atuação no receptor de dois ou mais sinais indesejáveis com frequências específicas, cujo produto, obtido pela passagem por circuitos não lineares, gera um sinal dentro da faixa de passagem do sinal de informação (intermodulação) que se propaga pelos seus estágios de filtragem , podendo introduzir efeitos não lineares nos estágios de amplificação.

Para aplicações típicas com receptores móveis, a intermodulação de terceira ordem é a maior causa de interferências, podendo ser expressa em termos da potência de sinal requerida na entrada para se obter um resultado equivalente ao ruído no receptor. Esta potência equivalente pode ser obtida da fórmula

[16]:

$$P_e = -93 + 2P_n + P_f - 60 \log_{10} f(\%) \quad (\text{II.1})$$

onde:

P_e potência equivalente (dBm)

P_n potência do sinal com frequência mais próxima à desejada (dBm)

P_f potência do sinal com frequência mais distante à desejada (dBm)

$f(\%)$.. separação relativa da frequência mais próxima, dada por $(|F_{or} - F_n| \times 100 / F_{or})$, sendo F_{or} a frequência desejada

Para se reduzir os efeitos desta intermodulação são utilizados em geral dois métodos:

- . redução da não-linearidade nos estágios do receptor;
- . uso de atenuadores na entrada do receptor, pois na maioria dos casos uma atenuação no sinal desejado significa n vezes a atenuação do sinal indesejado de enésima ordem.

II.1.2 - Interferência co-canal

E composta por sinais de frequências contidas na faixa de passagem do receptor, sendo os mesmos amplificados e processados da mesma maneira do sinal desejado. Isto torna os receptores bastante vulneráveis a este tipo de interferência, podendo a mesma chegar a mascarar a recepção. E estabelecido em geral um limite de rejeição do sinal no receptor que depende de sua banda de passagem, dado por [16]:

$$L_r = F \cdot K \cdot T \cdot B_r \quad (\text{II.2})$$

onde:

- L_r limite de rejeição do receptor (watts)
 K cte. de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ Watts/ K/Hz)
 T temperatura (K)
 B_r faixa de passagem (Hz)
 F figura de ruído

II.1.3 - Ruído eletromagnético

A maior fonte de ruído eletromagnético em sistemas de terminais móveis são os equipamentos de ignição automotiva. A potência de ruído externo mínima pode ser expressa por [23]:

$$P_n = F_a + B - 204 \text{ dB} \quad (\text{II.3})$$

onde:

- P_n potência do ruído em dB ($10 \log_{10} p_n$, onde p_n é a potência em watts)
 F_a figura de ruído externo em dB ($10 \log_{10} f_a$, onde f_a é o fator de ruído externo)
 B banda de potência de ruído em dB ($10 \log_{10} b$, onde b é a banda de ruído em Hz)

DUFF [16] apresenta um modelo matemático para a intensidade média de ruído dado por:

$$E = -11 \log_{10} B_r + 17 \log_{10} C - 20 \log_{10} (R/10m) \quad (\text{II.4})$$

onde:

- E intensidade média de ruído (dBuV/m)
 B_r faixa de passagem do receptor (KHz)
 C taxa de tráfego (carros/minuto)
 R distância do fluxo (metros)

A forma mais usual de se combater os efeitos dos ruídos é a elevação da intensidade de campo do sinal desejado, sendo em geral estabelecidos níveis mínimos para a mesma. Este mínimo pode ser representado pela relação sinal / ruído total, cujo valor convencionalmente aceito para a manutenção de uma comunicação confiável é da ordem de 12 dB [24]. Dessa forma o fator determinante no limite inferior para a intensidade de sinal é a percentagem de tempo para a qual esta deve exceder o limite, estabelecendo a qualidade de serviço necessária ao sistema. Um alto nível de serviço pode requerer que esta percentagem ultrapasse aos 99% do tempo.

II.2 - Disponibilidade do equipamento e do canal de comunicação

Em sistemas voltados para o atendimento médico a disponibilidade de recursos e serviços é fundamental na definição dos contornos do sistema, devendo permitir a minimização dos tempos envolvidos na transferência de informações.

As recomendações de órgãos reguladores como o CCIR ('International Radio Consultative Committee') [24] em relação aos serviços de rádio móvel terrestre definem que em aplicações que requerem alto grau de serviço como é o caso, a comunicação deve estar disponível por mais de 99% do tempo de utilização. Este limite diz respeito principalmente à disponibilidade do canal de comunicação, devendo entretanto incorporar os efeitos da disponibilidade do equipamento. No caso das especificações de equipamento não permitirem que se alcance tal valor,

devem ser adotadas soluções alternativas como o uso de equipamentos de reserva (duplicação), desde que tais soluções sejam consideradas economicamente viáveis. Já as restrições relacionadas com a disponibilidade do canal de comunicação devem envolver a minimização das variações do campo elétrico disponível no receptor e a adoção de limites de cobertura para as estações, envolvendo a comutação para outras com melhor qualidade de sinal na posição considerada.

II.2.1 - Atenuação do sinal

Em sistemas móveis as variações no campo elétrico que determinam a queda ocasional de um canal de comunicação são em geral devidas às atenuações sofridas pelos sinais que trafegam neste canal durante o percurso dos diferentes caminhos de propagação disponíveis. Estas atenuações podem ser classificadas nos quatro tipos principais a seguir.

II.2.1.1 - Atenuação devida à propagação de espaço livre

É representada pela perda esperada em uma região livre de objetos que possam absorver ou refletir a energia do sinal. É descrita pela relação [2]:

$$\frac{Pr}{Pt} = \frac{1}{4 \cdot d^2} \cdot gr \cdot gt \quad (II.5)$$

onde:

Pr potência recebida

Pt potência transmitida (mesma unidade de Pr)

..... comprimento de onda do sinal transmitido

d distância entre antenas (mesma unidade de)

gr ganho da antena receptora

gt ganho da antena transmissora

Se considerarmos a atenuação em decibéis e a utilização de antenas isotrópicas omnidirecionais, a equação pode ser descrita na forma [14] :

$$Ll = 32.45 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d \quad (II.6)$$

onde:

Ll perdas (dB)

f frequência (MHz)

d distância (Km)

Verifica-se então que este tipo de atenuação tem uma dependência bastante clara da frequência e da distância entre antenas, podendo seu valor ser ajustado através destes parâmetros.

II.2.1.2 - Atenuação devida à propagação de terra plana

E causada pela influência do chão na geração e propagação das ondas eletromagnéticas. Seus efeitos podem ser descritos pela relação simplificada [2]:

$$Pr = \frac{hm \cdot hb}{d^2} \cdot gt \cdot gr \quad (II.7)$$

onde:

Pr potência recebida

Pt potência transmitida (mesma unidade de Pr)

d distância entre antenas

gr ganho da antena receptora

gt ganho da antena transmissora

hm altura da antena móvel (mesma unidade de d)

hb altura da antena fixa (mesma unidade de d)

Esta relação considerada em decibéis e com a utilização de antenas isotrópicas pode ser representada por [14] :

$$Lp = 118,7 - 20 \log_{10} hm \cdot hb + 40 \log_{10} d \quad (II.8)$$

onde:

Lp perdas (dB)

hm altura da antena na estação móvel (metros)

hb altura da antena na estação base (metros)

d distância (Km)

Note-se que tal atenuação pode ter seu valor ajustado através da variação na altura das antenas e na distância entre as mesmas.

II.2.1.3 = Atenuação por sombras

É ocasionada pela obstrução do caminho direto do sinal . Este tipo de atenuação é de duração diretamente proporcional ao tamanho do obstáculo, obedecendo a uma distribuição Gaussiana cuja resultante é bastante específica do ambiente de aplicação, sendo então bastante difícil obter um modelo

geral de perdas. HAMSHER [19] e BULLINGTON [2] apresentam gráficos representativos de tais perdas quando causadas por vales, interpretados pela parcela de atenuação adicionada à perda média (em decibéis), sendo esta parcela relacionada com a altura da estrutura e a frequência utilizada (figura II.1) . Tal representação deve entretanto ser considerada com cuidado, pois considera a perda média como função somente das atenuações devidas à propagação de terra plana.

Para a antena transmissora

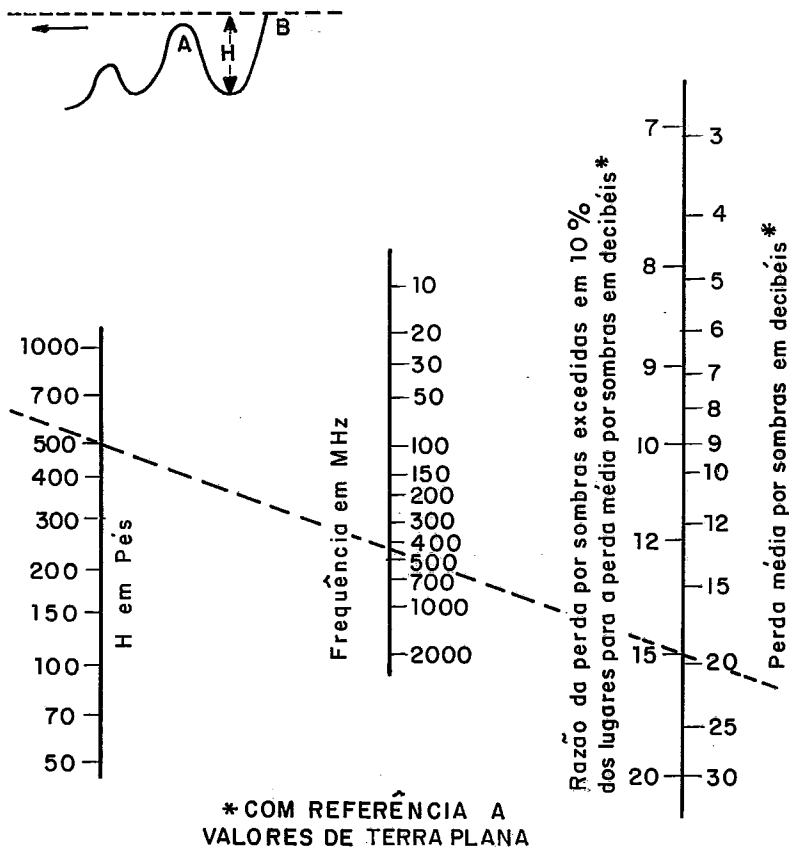


Figura II.1 - Distribuição estimada de atenuação por interposição de estruturas (BULLINGTON [2], figura 11).

Uma forma de combate a este tipo de atenuação é a adoção de sinais com frequências de operação mais baixas, pela maior facilidade de contornar obstáculos que apresentam. A elevação da antena receptora também pode ser considerada, impondo-se porém um limite operacional para o deslocamento das mesmas em rodovias (altura máxima dos veículos).

II.2.1.4 - Atenuação por multicaminhos de propagação

É ocasionada por reflexões e/ou difração de parcelas do sinal transmitido, em obstáculos reais que as direcionam para o receptor, interferindo destrutivamente ou mesmo construtivamente no sinal recebido.

Esta atenuação tem como características principais sua seletividade quanto à frequência do sinal, que apresenta estreita relação com os intervalos entre áreas críticas, e a ocorrência em períodos curtos, seguindo sua variação em relação à média local uma função de densidade de probabilidades de Rayleigh [16]. BULLINGTON [2] apresenta através da figura II.2 as características típicas de atenuação por multicaminhos em enlaces de rádio.

Mesmo em veículos estacionários o sinal pode sofrer os efeitos deste tipo de atenuação, graças ao movimento dos veículos próximos aos mesmos. A existência dos multicaminhos pode permitir também a ocorrência de 'clicks' [24], formados pela ação simultânea de um mínimo no sinal desejado e de um máximo em um sinal interferente, também sob efeito dos multicaminhos, e que se apresenta sob a forma de um ruído de duração bastante curta.

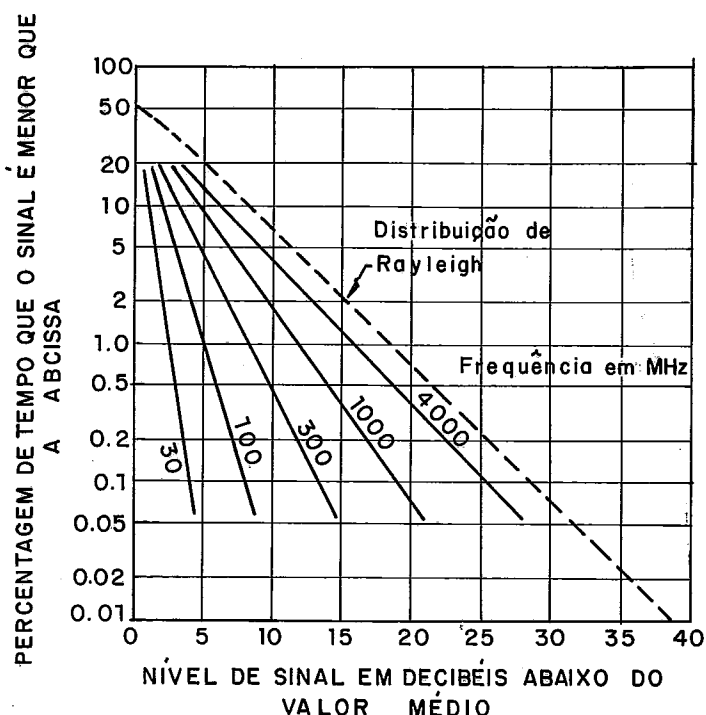


Figura II.2 - Características típicas de atenuação por multicaminhos em distâncias de 30 a 40 milhas (BULLINGTON [2], figura 4).

A técnica mais utilizada na redução dos efeitos da atenuação por multicaminhos é a diversificação espacial, devido principalmente à largura bastante reduzida das áreas de pico (tanto mínimas quanto máximas). Além disso, para se evitar distorções no receptor nos momentos de interferência construtiva, são utilizados elementos atenuadores ativos, que regulam o nível de sinal na entrada do receptor.

II.2.2 - Modelos estatísticos

Um grande número de modelos estatísticos é disponível

na literatura para a avaliação de perdas em canais de comunicação estabelecidos com estações móveis. DELISLE et alii [14] apresentam um estudo comparativo bastante completo de alguns dos principais modelos existentes, desde o consagrado modelo descrito por Egli para regiões abertas, o qual não considera perdas por difração ocasionadas pela propagação sobre terrenos irregulares, até modelos que pretendem ser completos na avaliação da propagação sobre áreas urbanas e suburbanas, como os derivados por Hata e por Allsebrook e Parsons, passando ainda por modelos como o de Edward e Durkin, que simplesmente considera a soma das perdas teóricas por difração sobre terrenos irregulares e por propagação de terra plana como necessárias para a avaliação da perda total no caminho de propagação. As conclusões dos autores no trabalho apontam na direção da utilização dos modelos de Hata e de Allsebrook e Parsons, por permitirem uma cobertura genérica dos tipos de ambiente passíveis de aplicação deste tipo de sistema (áreas urbanas e suburbanas). Para o projeto do sistema porém consideraremos somente o modelo derivado por Allsebrook e Parsons, posto que é o único que avalia os efeitos decorrentes de interposição das elevações do terreno e de edifícios no caminho de propagação dos sinais de forma ponderada, permitindo a obtenção de uma distribuição uniforme dentro do ambiente de aplicação caso o perfil do mesmo justifique estas considerações, como é o caso. Este modelo é baseado numa combinação matemática das perdas teóricas por propagação em espaço livre e de terra plana com as perdas esperadas por difração em terreno irregular e edifícios, além de um fator de correção para frequências

maiores que 200 MHz. Tal combinação é dada por:

$$L_t = L_l + ((L_p - L_l)^2 + L_d^2)^{1/2} + L_e + X \quad (\text{II.9})$$

onde:

- L_t perda total (dB)
 L_l perda por propagação em espaço livre (dB)
 L_p perda por propagação de terra plana (dB)
 L_d perdas por difração em terrenos irregulares (dB)
 L_e perdas pela interposição de edifícios (dB)
 X fator de correção para frequências acima de 200 MHz (dB)

O valor de L_e pode ser obtido através de:

$$L_e = 20 \log_{10} \frac{h_o - h_m}{548 \times (d_r \times 10^{-3} \times f)^{1/2}} + 16 \quad (\text{II.10})$$

onde:

- h_o ... altura média de edifícios nas imediações (metros)
 h_m ... altura efetiva da antena móvel (metros)
 d_r ... largura média das ruas percorridas (metros)
 f frequência de operação (MHz)

Note-se que tal modelo não considera os efeitos da atenuação devida aos multicaminhos de propagação, devendo portanto os mesmos serem avaliados e incorporados à parte.

Pode-se ver que os efeitos de atenuação em sistemas de rádio difusão dependem sobremaneira da topologia considerada, sendo portanto necessária a definição preliminar do ambiente de aplicação para que possam ser associados valores práticos para os níveis de atenuação característicos deste ambiente.

II.3 - Tempo de transferência da informação

Nos sistemas de processamento voltados para aplicações comerciais um dos principais fatores envolvidos na determinação do nível de satisfação do usuário são os atrasos na transferência da informação. Em sistemas de comunicação para aplicações em telemedicina deve-se esperar que tais atrasos envolvam não somente o conceito de satisfação com os serviços, mas também a atualidade da informação em determinado instante no seu ponto de destino.

Em um sistema de comunicação com eficiência máxima na transferência, todas as informações apresentadas ao equipamento de comunicação deveriam ser imediatamente transmitidas e recompostas no receptor. Tal sistema ideal teria como fator único de atraso a própria taxa de transmissão. Porém, na realidade, o tempo de transferência pode ser dado pelo tempo de acesso ao canal (principalmente em se considerando um canal compartilhado entre duas ou mais estações) somado ao tempo de tráfego total das parcelas de dado e controle que compõe as mensagens. Note-se que o único controle de integridade das informações considerado está embutido no próprio formato da mensagem, podendo porém haver necessidade de adoção de retransmissão por níveis de tratamento superiores, o que afeta a eficiência da comunicação. Mesmo os atrasos devido à situações em que o canal não está disponível por condições adversas devem ser de ordem de grandeza tal que devam ser considerados pelos níveis de controle mais elevados.

Dessa forma, os principais parâmetros a serem considerados na determinação dos atrasos de transferência em um canal de comunicação são sua taxa de transmissão, a eficiência dada pelo formato das mensagens e o tempo médio de acesso ao canal, determinado basicamente pela eficiência do método de acesso escolhido. Note-se que a determinação do limite para o atraso deve considerar principalmente a recomposição de forma aceitável dos sinais originais na estação receptora, sendo que os valores mais críticos devem se relacionar com os sinais de maior frequência a serem transferidos, pelo maior volume de dados gerados na digitalização.

Neste trabalho é considerada a monitoração de quatro tipos de informação:

- . analógicas, provenientes de equipamentos de biometria;
- . digitais, relativas à apresentação de textos;
- . voz (conversação);
- . imagens.

Note-se que os sinais analógicos e de voz podem ser transmitidos na forma pura (analógica) ou digitalizados. Num sistema onde os problemas de atenuação no caminho de propagação são significativos, é desejável a transferência na forma digitalizada, a qual permite um maior controle sobre os níveis de erro incidentes na comunicação.

Os sinais analógicos possuem em geral frequências baixas. Se considerarmos por exemplo um conjunto de sinais vitais dado por pressão sanguínea, eletrocardiograma, eletroencefalograma, taxa respiratória e temperatura, teremos uma frequência máxima da ordem de 250Hz [35].

Sem a imposição de limites para o tempo de composição de uma imagem digitalizada em seu ponto de destino, pode-se optar pela adoção de uma taxa de transferência padronizada para terminais teletipo na sua apresentação, devendo ser esta mesma taxa utilizada na transferência de textos.

A transferência de voz digitalizada deve ser realizada a uma taxa que permita sua recomposição na estação destino de forma a gerar um sinal de áudio de boa qualidade, que CARLSON [6] considera como sendo aquele que varia dentro de uma faixa de frequências entre os limites de 200Hz a 3,2 KHz.

De acordo com os atrasos permitidos na transferência dos sinais envolvidos, podem ser definidas as técnicas de comunicação utilizadas. A transmissão através de um canal de comunicação compartilhado pode ocasionar atrasos na concorrência por este canal que degradem significativamente a qualidade de um sinal. Tal fato pode ter seus efeitos minimizados ou mesmo eliminados pela adoção de técnicas de 'pipeline' , onde as informações são enfileiradas e transmitidas de forma condensada nos instantes em que o canal esteja disponível , com expansão proporcional no receptor . Logicamente haverá uma inserção de tempo de transferência que, se for mantida a uma taxa constante, possibilitará um fluxo contínuo de informações no sistema. Para os sinais de voz digitalizada , um atraso considerado aceitável para a entabulação de uma conversação se situa em torno de 40 ms. Tal atraso, considerado para um sinal biológico com frequência máxima em 250 Hz, não será considerado como capaz de introduzir diferenças perceptíveis na interpretação da variação deste sinal no seu ponto de destino.

CAPÍTULO III

Modelagem do sistema

O objetivo principal deste estudo é apresentar um conjunto de ferramentas e informações que permitam o projeto de um sistema de terminais móveis para comunicação de dados, com um enfoque direcionado para aplicações de telemedicina. Dessa forma, o presente capítulo pretende descrever a seqüência de atividades envolvidas na especificação de um sistema deste tipo pela aplicação das mesmas em um ambiente de contornos conhecidos, estabelecendo um serviço hipotético e analisando posteriormente sua viabilidade e seu desempenho.

O primeiro passo deverá consistir da identificação dos parâmetros de cobertura, ou seja, dos requisitos e limitações impostos pelas características da área a ser coberta. Para isso, torna-se imprescindível a delimitação precisa dos contornos desta área, principalmente no que diz respeito à topologia, densidade demográfica e incidência de ruídos.

Inicialmente podemos considerar três tipos de relevos a serem cobertos:

- . Rurais, que se caracterizam pela baixa incidência de sinais interferentes e pelas grandes distâncias a serem cobertas pelos enlaces de comunicação. A situação topográfica pode ser tanto plana como acidentada, sendo que em geral os contornos não são abruptos. Em tais regiões é desejável uma cobertura que permita maior alcance.

- . Suburbanos , onde a incidência de sinais interferentes já é mais pronunciada , porém sem apresentar grandes obstáculos à propagação do sinal . O tipo de enlace utilizado nesses casos depende basicamente da atenuação no caminho de propagação e da imunidade à ruídos de origem eletro-eletrônica e natural, tais como os ruídos atmosférico e solar.

- . Urbanos, caracterizados pela descontinuidade pronunciada das estruturas edificadas e pelo grande número de fontes de interferência, como ignição automotiva e aparelhos eletro-eletrônicos. A interposição das estruturas ocasiona principalmente a atenuação por sombras e a atenuação pelos multicaminhos de propagação. As distâncias cobertas pelos enlaces de comunicação são menores, pois além dos altos níveis de atenuação incidente, a intensidade de sinal disponível na recepção deve ser forte o bastante para que o mesmo seja identificado entre os vários sinais indesejáveis recebidos. Podem ser necessárias também estações estrategicamente localizadas, como , por exemplo , estações com transmissão direcionada ao longo de túneis ou de ruas cercadas por altos edifícios.

O tipo de região considerada influencia fortemente na escolha da frequência para os canais de comunicação , pois os enlaces envolvidos estão condicionados a problemas bastante distintos entre si. Em regiões urbanas por exemplo , uma das principais preocupações na determinação da frequência deve ser a imunidade à ruídos e interferências, enquanto que em regiões rurais deve-se considerar basicamente o alcance

permissível.

Outro fator limitante na cobertura pode ser a densidade de usuários , que pode sobrecarregar uma estação ou o próprio canal de comunicação. Nesse caso devem ser adotadas alternativas como a utilização de um maior número de canais, com a definição ou não de novas estações que dividam o gerenciamento dos usuários , podendo-se mesmo chegar à adoção dos chamados sistemas celulares. Entretanto , o sistema considerado dificilmente estaria submetido a este tipo de problema , pois o número de viaturas circulantes em horários de pico não deve ser suficiente para saturar um enlace.

III.1 - Definição de contornos

A implantação de um sistema de telemedicina com estações móveis deve ser justificada pela sua influência na melhoria da qualidade dos serviços médicos disponíveis aos usuários e pela viabilização econômica de sua utilização . Considerando estes fatores podemos imaginar sua aplicação na integração de um serviço público de saúde em uma área de densidade demográfica elevada, visando a obtenção de uma relação ótima entre custo e benefício. Pelo conhecimento disponível da região, a escolha recaiu então sobre a área do Município do Rio de Janeiro, cujas características devem então ser descritas para que sejam utilizadas nas etapas posteriores do projeto.

Na tabela III.1 são apresentados dados conseguidos junto ao IBGE, relativos ao número de ambulâncias em serviço na rede Municipal de Saúde do Município do Rio de Janeiro.

Souza Aguiar.....	07
Miguel Couto.....	03
Rocha Maia.....	02
Lourenço Jorge.....	02
Paulino Werneck.....	02
Umamps Jacarepaguá.....	02
Carmela Dutra.....	02
Herculano Pinheiro.....	01
Menino Jesus.....	01
Barata Ribeiro.....	01
Fernando Magalhães.....	01
Nossa Senhora do Loreto.....	01
Salgado Filho.....	03
Biometria Pça. da Bandeira.....	01
Geriatrics 28 de Setembro.....	01
Sales Neto.....	01
Vila Bowi Paquetá.....	01
Fazenda Modelo.....	01
total:	33

Tabela III.1 - Número de ambulâncias em operação no serviço público municipal do Rio de Janeiro.

Podemos dessa forma contabilizar 18 pontos centralizados de atendimento médico, com distribuição média de 1,8 viaturas para cada.

Para que o dimensionamento do sistema considere uma margem de crescimento que envolva um período de 10 anos, devemos fazer a projeção simplificada de sua evolução, a partir da suposição de que o crescimento da frota de

ambulâncias do município seja da ordem de 20% ao ano. Com isso chegamos a um número de viaturas em 10 anos de 11,3 por cada hospital, distribuídas de forma ponderada de acordo com a densidade demográfica das regiões servidas por cada um deles. Note-se que tais cálculos não consideram a construção de novos hospitais, sendo por isso uma consideração de pior caso. Um levantamento mais acurado deveria ser feito em cada uma das comunidades servidas por estes centros, o que ocasionaria entretanto um aumento demasiado na complexidade do trabalho. Por isso, o caráter genérico de tais considerações deverá ser mantido. Será considerada, ainda para simplificação, uma distribuição homogênea dos usuários dentro dos limites de cobertura do sistema.

O relevo é caracterizado por áreas de altitude média de 10 metros acima do nível do mar, entremeadas por elevações que variam em geral numa faixa de 30 a 1100 metros de altura. Tal fato torna favorável a utilização de estações retransmissoras localizadas em algumas destas elevações, de onde o alcance pode ser bastante ampliado. Deste modo, é interessante fazer com que a determinação da localização dos pontos de irradiação fixos do sistema não dependa estritamente da localização do centro de atendimento, possibilitando a adoção de enlaces híbridos envolvendo conexões fixas entre os pontos de atendimento e os de difusão, e conexões móveis entre os pontos de difusão e os veículos do sistema.

O levantamento das condições de propagação do sinal no ambiente está intimamente ligado a incidência de ruídos no

mesmo, que por sua vez depende da densidade demográfica e do perfil funcional das regiões cobertas pelas estações. Devemos então distinguir as áreas de ocupação residencial daquelas onde há predominância de instalações industriais para fins de caracterização. Note-se que, por simplicidade, consideraremos a distribuição demográfica como sendo homogênea. Como não foram localizadas publicações relativas ao levantamento da incidência de ruídos na região do grande Rio , tomaram-se como base os resultados obtidos por outros autores ([16], [23]), procurando atender de forma genérica a áreas classificadas como urbanas (distando de 0 a 16 quilômetros do centro de uma cidade), suburbanas (distando de 16 a 48 quilômetros do centro de uma cidade) e rurais (situadas a distâncias maiores que 48 quilômetros do centro de uma cidade). No caso considerado são aplicáveis as curvas relativas às regiões urbanas e suburbanas, devendo as mesmas serem utilizadas na modelagem do sistema.

Com o ambiente de aplicação caracterizado, podemos então definir os parâmetros de cobertura do sistema.

III.2 - Parâmetros de cobertura e de usuário

Os parâmetros de cobertura e de usuário, decorrentes das características do ambiente de aplicação e da qualidade de serviço requerida , são fatores determinantes na definição dos elementos do sistema e de sua disposição na área considerada . Note-se que a sua influência em um projeto varia de acordo com tipo de aplicação considerado, devendo a exposição ser acompanhada de sua ponderação no processo decisório envolvido.

Podemos identificar como parâmetros principais na modelagem de um sistema de atendimento médico aqueles relacionados nos sub-itens a seguir.

III.2.1 - Número de usuários

Em um sistema de telemedicina composto por terminais móveis, os usuários são as viaturas que compõem a frota integrada do serviço de atendimento considerado. Podemos contabilizar através da tabela III.1, trinta e três veículos compondo a frota municipal, sendo que partiremos do princípio de que esta seja totalmente integrada pelo sistema projetado. Considerando-se uma distribuição homogênea e a projeção de crescimento estimada, temos que no período considerado de 10 anos o projeto deverá ser capaz de abranger um total de 204 viaturas em uma configuração máxima, onde o pior caso considera a utilização simultânea do sistema por todas as viaturas que o compõem.

III.2.2 - Natureza da informação

As características das informações que trafegam em sistemas de comunicação são de grande importância na elaboração dos mesmos, pois delas dependem basicamente a forma de utilização dos canais de comunicação e o nível de controle requerido para a manutenção do enlace.

Para a caracterização das informações desejáveis no sistema de telemedicina considerado, foram contactados membros de entidades ligadas à área de saúde (Programa de Engenharia Biomédica da COPPE e Hospital Universitário da

UFRJ), sendo coletados alguns pontos de interesse.

Como visto anteriormente, a monitoração vital de pacientes em veículos através de enlaces de rádio pode envolver basicamente quatro tipos de sinal:

- . sinais de telemetria;
- . sinais de voz;
- . texto;
- . imagens.

Os sinais de telemetria são desejáveis em situações onde não é possível um diagnóstico por monitoração local, por falta de recursos materiais ou humanos para análise.

Os sinais de voz tem seu interesse ligado à entabulação de conversação sobre procedimentos locais ou de preparação do centro de tratamento em casos de internação, bem como no auxílio à obtenção de rotas de transferência em situações de contenção de tráfego, ou de unidades com melhores condições de atendimento (menor tempo de trajeto).

As informações na forma de texto se aplicam no acesso a dados sobre o paciente armazenados em bancos de dados situados em centros de informação, para análise de histórico médico e particularidades dos diferentes casos.

Considerando estas possibilidades, podemos avaliar então o nível de interesse de cada uma destas informações na associação ao sistema. A disponibilidade de monitoração remota de funções por telemetria é bastante questionável no que diz respeito a atendimentos de emergência, pois a natureza imediatista e criteriosa das ações a serem tomadas

em casos de anormalidade no quadro clínico prevêem que no interior do veículo haja uma pessoa capacitada a diagnosticar e tratar de tais situações (um enfermeiro ou paramédico) , o que de certa forma atenua a necessidade de transferência desta informação . Além disso , tais medições devem em geral ser realizadas com o paciente em estado de imobilidade devido à grande sensibilidade dos equipamentos envolvidos, o que em caso de transporte é praticamente impossível. Quanto a sua utilização na extensão do atendimento para áreas carentes, há um interesse considerável, não só pela natureza estática do ambiente, como também pela otimização no uso dos equipamentos.

A necessidade de troca de informações entre uma unidade móvel e o centro de atendimento por si só, já justifica a utilização de um canal de comunicação para sinais de voz, devendo esta ser de boa qualidade no receptor.

A utilização de informações textuais por sua vez, é atraente no que diz respeito à consultas a bases de dados, que podem ser compostas por históricos médicos de pacientes, e na utilização de sistemas computacionais de auxílio a diagnósticos [40]. A transferência de imagens por fim, tem seu interesse ligado à análise remota das mesmas por especialistas nos pontos centrais do sistema.

Podemos definir dessa forma, uma aplicação onde existem dois tipos distintos de atendimento e que por isso devem considerar duas configurações para as estações móveis . A primeira, voltada para a instalação temporária de bases remotas (móveis) com a finalidade de oferecer maiores

recursos médicos a comunidades carentes, onde os veículos, de maior envergadura, possuem capacidade de comunicação para os três tipos de sinal considerados, contando com o equipamento para visualização de texto em vídeo ou impressora, e equipamentos de biometria ou mesmo transferência de imagens. A segunda configuração seria mais limitada, onde os serviços de comunicação se resumiriam à transferência de informações de voz digitalizada e texto, contando para isso com um mínimo de equipamento.

Note-se, entretanto, que é interessante a utilização de um equipamento de comunicação único para as duas configurações, capaz de compor mensagens digitais contendo os quatro tipos de informação consideradas anteriormente, seja esta composição realizada de forma estática ou dinâmica, para fins de padronização e modularidade na sua alocação entre os diferentes veículos.

Baseando-se na literatura consultada ([6], [35]), serão utilizados no presente trabalho os valores para as faixas de variação de frequência e amplitude dos sinais analógicos apresentados na tabela III.2.

Sinal	Freqüência	Amplitude
Voz boa qualidade	200Hz - 3,2Kz	depende do transdutor
Pressão sanguínea	DC - 30Hz	0 - 400mmHg
ECG	0,1 - 100Hz	0,5 - 4 mV
Eletroencefalograma	0,2 - 50Hz	5 - 300uV

Tabela III.2 - Características dos sinais envolvidos em aplicações de telemedicina.

O somatório da taxa de geração de dados para cada um dos tipos de sinal considerados determina a taxa de transferência efetiva mínima no canal de comunicação, de modo que apesar do atraso inserido pelas próprias características do canal (com relação à propagação e eficiência) e pelo compartilhamento do mesmo entre estações, seja mantida a coerência na interpretação das mensagens, evitando distorções na recuperação da informação.

De acordo com STANLEY [37], apesar da freqüência de amostragem mínima para sinais analógicos ser da ordem de $f_a = 2W$, onde W é a freqüência máxima do sinal analógico, é comum encontrar sistemas comerciais onde é resguardada uma banda de segurança para esta freqüência, devida principalmente à limitações encontradas nos filtros utilizados na recuperação dos sinais. Será utilizada desse modo uma margem de 25% na freqüência de amostragem em relação

ao mínimo requerido.

É interessante a adoção de uma representação binária padronizada para a variação de amplitude dos sinais analógicos envolvidos. A utilização de 8 bits para a representação da amplitude destes sinais permite a obediência aos valores de escala relacionados na tabela III.3. Nesta tabela são apresentadas as taxas de geração de dados correspondentes a estes valores.

Sinal	Freqüência de amostragem	Escala	Taxa de geração
Voz de boa qualidade	8KHz	---	64Kbps
Pressão sanguínea	75Hz	5mmHg	600bps
ECG	240Hz	0,1 mV	1920bps
Eletroencefalograma	120Hz	5uV	960bps

Tabela III.3 - Taxas de geração de dados para os sinais analógicos envolvidos no sistema.

Para a transferência de imagens consideraremos sua transmissão na forma estática, sem preocupação com limitações no tempo de transferência, adotando assim um caráter de não urgência para a sua visualização no ponto de destino. Tal fato possibilita uma redução nas taxas de transferência utilizadas para tal fim. Com isto, vemos que a grande limitação em termos de banda de passagem na transferência

das informações está na transmissão da voz digitalizada . Uma alternativa para a redução desta banda é a adoção de técnicas de compressão, que diminuem a quantidade de bits necessária à transferência da informação através do processamento não-linear do sinal analógico , ou mesmo da redução das seqüências de valor uniforme no sinal amostrado, sendo possível em certos casos se realizar a transferência da variação relativa do sinal ao invés de valores absolutos.

Em sua publicação , HOYLE e FALCONER [20] apresentam medidas comparativas, obtidas por simulação, do desempenho de alguns codificadores de voz digital em transmissão por canais sujeitos a condições adversas de propagação, como as encontradas em sistemas de terminais móveis . Os três codificadores testados baseiam-se em variações de codificação preditiva: APC ('adaptive predictive coding'), CVSD ('continuously variable slope delta-modulation') e RELP ('residually excited linear predictive coding'), sendo os dados de simulação apresentados na figura III.1.

Os resultados apontam para a relativa simplicidade e robustez dos codificadores RELP, para sinais de voz limitados superiormente em 3,33KHz e amostrados a uma taxa de 6,67KHz. Temos ainda que nenhum dos métodos apresenta como resultado de opinião média ('Mean Opinion Score', unidade de referência para medição da qualidade da voz, que assume valores de 1,0 a 5,0) voz de qualidade comparável à linhas telefônicas sem degradação , que apresenta índices entre 4,0 a 4,5. Apesar disso, os métodos APC e RELP à taxas de transferência de 11,4 Kbps e 12,4 Kbps, respectivamente, apresentam bons níveis de qualidade.

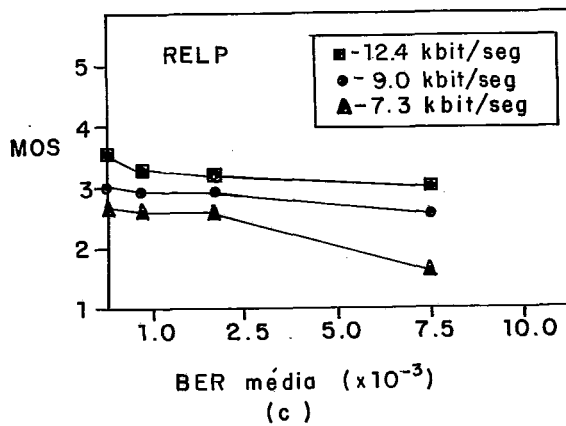
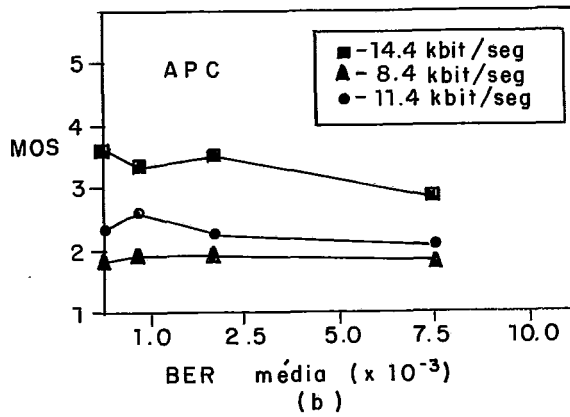
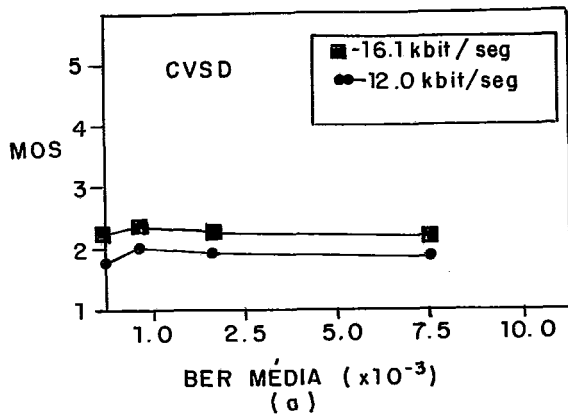


Figura III.1 - MOS x taxa média de erros (BER) para várias condições e codificadores em canais de rádio móvel (HOYLE [20], figura 1).

E interessante notar-se ainda que:

- . Os gráficos dizem respeito à codificação pura , sem controle de erros. Com adição de detecção/correção de erros os níveis de qualidade podem ser elevados.
- . Na mesma publicação é destacado o desempenho de outro método em meios livres de erro ('adaptive subband coder'), sendo que por falta de informação acerca de seu desempenho em condições adversas foi o mesmo desconsiderado para esta aplicação.
- . As taxas de erro consideradas ('bit error rates') para aplicações de terminais móveis encontram-se na faixa de 1×10^{-2} a 1×10^{-3} .

Para a definição da taxa de transferência de voz digital utilizada, devem ser considerados ainda os seguintes pontos:

- . Na faixa de 64 Kbps, a gama de codificadores disponíveis (codificadores 'subband', 'adaptive', 'transform' e 'predictive') permite grande flexibilidade na escolha da melhor combinação entre qualidade de voz, velocidade de transferência e custo associado, sendo que alguns autores como CHIEN et alii [7] a adotam como padrão.
- . Tal faixa permite ainda o uso da melhor combinação entre a adoção de uma frequência de amostragem inferior (6,67 KHz, gerando sinal digital a taxa de 12,4 Kbps como no exemplo considerado) e complementação da capacidade do canal com controle de erros e outro tipo de informação, ou a inserção de

uma margem de segurança na frequência de amostragem do sinal (8KHz) para compensação na recuperação do sinal.

Podemos então concluir pela reserva de uma parcela da capacidade de transferência no canal de 16 Kbps para a transmissão de voz digitalizada.

Como num ambiente de aplicação emergencial o interesse maior está no correto entendimento das mensagens transmitidas, é importante se elevar o nível de qualidade da voz disponível no receptor, devendo então ser considerada uma margem de segurança na frequência de amostragem de sinal de voz. Além disso, a existência de atrasos inseridos pela transferência em um canal de comunicação instável será menos significativa quanto maior for a velocidade de propagação da informação no mesmo.

Para a transmissão de imagens em um canal de comunicação digital podemos nos basear no sistema experimental de telemedicina implementado entre o Hospital Civil de Susa e o Departamento Cirúrgico do Hospital Regional de Torino, na Itália [40], que realiza a transferência de informações de voz, ECG, fac simile de documentos e imagens de radiografias através de uma linha telefônica direta. As imagens de radiografia são digitalizadas e transmitidas por um equipamento que suporta quadros de 256 x 512 pixels com graduação de 64 tons , o que equivale a 786.432 bits (256 x 512 x 6) de informação.

A transmissão total do quadro é realizada em aproximadamente 85 segundos, o que sugere uma taxa de transferência da ordem de 9,6 Kbps. Segundo o autor [40], os resultados de interpretação no hospital destino foram considerados satisfatórios, sendo que há a sugestão para a utilização de equipamentos que suportem 256 tons em situações que demandem maior detalhamento na imagem recebida.

Na aplicação proposta será considerada a utilização da configuração básica utilizada no sistema apresentado [40], limitando entretanto a taxa de transferência efetiva em 2,4 Kbps, cujo efeito maior é o incremento no tempo de transferência para aproximadamente 5 minutos e 28 segundos. Com isso, podemos otimizar a utilização do canal de comunicação em situações de pico onde todos os tipos de informação trafegam no seu volume máximo, resguardando a maior parcela para as informações com maior taxa de geração (como voz digitalizada).

Note-se entretanto que em situações reais seria óbvia a sub-utilização do canal em um esquema de alocação estática, sendo preferível o deslocamento dinâmico de parcelas entre os diferentes tipos de sinal de acordo com a demanda, o que pode significar grande redução no tráfego de informação e possibilitar o incremento na confiabilidade com a adoção de redundâncias, ao preço de uma maior complexidade do equipamento e da inserção de atrasos no tratamento do algoritmo de alocação e recuperação da informação.

Com as sugestões apresentadas podemos construir uma tabela delineando os contornos para uma divisão eficiente do

canal entre diversos tipos de informações consideradas, em situações com volume máximo de transferências.

Sinal	Taxa de transferência (bps)
voz de boa qualidade	16K
texto	1200
pressão sanguínea	600
ECG	1920
Eletroencefalograma	960
imagens	2400

Tabela III.4 - Taxas de transferência associadas aos sinais considerados.

III.2.3 - Qualidade da apresentação

A manutenção da qualidade dos serviços oferecidos deve considerar inicialmente a inteligibilidade das informações recebidas, estejam elas sob forma acústica ou visual. Dessa forma, é importante a definição de limites quantitativos para este fator, possibilitando a adoção de valores de projeto que incrementem o nível de satisfação dos usuários dentro da configuração adotada. Note-se porém que tais limites têm caráter subjetivo, sendo normalmente adotados como uma média dentro de um universo de valores outorgados por um grupo representativo de pessoas.

A inteligibilidade de informação por parte de um usuário pode ser afetada significativamente dentro do canal de comunicação pela incidência de interferências externas e pela degradação dos sinais neste canal. Através do

mascamamento, interposição e atenuação do sinal, as seqüências de informação, podem ser truncadas de tal forma que impossibilitaria a sua interpretação no ponto de destino, devendo ser estabelecidos limites de rejeição para a operação do sistema.

Para a definição de limites quantitativos para a inteligibilidade da informação devemos considerar a sua forma de apresentação, que em nosso caso pode ser acústica ou visual.

Para a informação acústica, representada pela voz digitalizada, é adotada em algumas publicações consultadas [20] a já apresentada unidade de referência MOS ('Mean Opinion Score'), sendo definidos os níveis de qualidade dentro da escala apresentada na tabela III.5.

! MOS	!	Referência de qualidade	!
! 1	!	insatisfatória	!
! 2	!	pobre	!
! 3	!	regular	!
! 4	!	bom	!
! 5	!	excelente	!

Tabela III.5 - Referências de qualidade para os níveis em escala MOS.

Para aplicações de telemedicina é importante que a qualidade da voz recuperada seja mantida a um nível elevado nesta escala, visto que este limite é suficiente para possibilitar a conversação em ambientes caracterizados por grande incidência de ruídos externos, como é caso das vias de

tráfego urbanas.

Deve-se considerar também a implementação do melhor isolamento acústico possível no compartimento de utilização do equipamento de comunicação, incrementando as condições de conversação. Podemos então estabelecer, a princípio, um limite de rejeição de conexão da ordem de 3 unidades MOS, permitindo no mínimo um nível de conversação regular.

Para a informação visual, representada pelas imagens digitalizadas e pela apresentação de textos em dispositivos de saída (video, impressora), o principal fator de qualidade é a nitidez dos contornos, que no caso dos textos depende basicamente das condições do equipamento utilizado. Em se tratando de imagens, o controle da qualidade deve ser direcionado basicamente para o processo de digitalização e recuperação da imagem e para a diminuição da incidência de erros agrupados na seqüência de mensagens, sem contudo permitir a proliferação de erros isolados, que podem prejudicar significativamente a interpretação da imagem.

A notificação 525-2 das Recomendações e Notificações do CCIR de 1986 [23], apresenta uma escala de graduação para a qualidade na recepção de imagens utilizada pela TASO ('Television Allocation Study Organization'), apresentada na tabela III.6, que pode ser utilizada como base para o estabelecimento de um limite subjetivo para a aceitação de imagens. Para o presente trabalho assumiremos que este limite se situe no grau 3 desta escala.

Grau	Designação	Descrição
1	excelente	imagens de alta qualidade
2	fina	visão agradável c/ interferência perceptível
3	possível	qualidade aceitável
4	marginal	imagem de qualidade pobre c/ interferência notável
5	inferior	imagem bastante pobre interferência notável
6	inaceitável	contornos indefiníveis

Tabela III.6 - Escala de graduação TASO.

III.3 - Características operacionais e econômicas

O desempenho de sistemas de comunicação com terminais móveis é fortemente influenciado pelas características que envolvem os equipamentos utilizados e pelas flutuações nas condições de propagação do sinal . Surgem dessa forma limitações operacionais que devem ser identificadas para que, no caso da existência de pontos críticos , seus efeitos possam ser atenuados ou mesmo eliminados, melhorando o desempenho global do sistema.

Outro fator relevante quando se fala em sistemas viáveis comercialmente são os custos envolvidos. Dessa forma , o projeto deve considerar as condições de aplicação das tecnologias estudadas, pois em geral quanto mais complexas as mesmas, maiores os custos.

Nos itens posteriores procuraremos então avaliar alguns fatores relacionados com o projeto e operação do sistema , a saber:

- . Tamanho dos equipamentos , potência disponível e eficiência na transmissão.
- . Robustez.
- . Tolerância á falhas.
- . Receptividade.
- . Facilidade de operação e manutenção.
- . Custos envolvidos.

III.3.1 - Tamanho do equipamento , potência disponível e eficiência na transmissão

As características operacionais dos equipamentos envolvidos em um sistema de comunicação móvel introduzem diferenças na disponibilidade de recursos para as estações base e para as estações móveis, sendo que as últimas têm um potencial mais limitado devido à versatilidade imposta ao equipamento (redução no tamanho) . Desse modo, as estações móveis se utilizam em geral de baterias para a geração de energia , o que implica na necessidade da realização de incrementos na eficiência do equipamento transmissor para obtenção de um aproveitamento otimizado desta energia. Tais incrementos podem ser conseguidos através de:

- . Minimização do consumo de energia do equipamento.
- . Utilização de antenas apropriadas, que permitam difundir ao máximo a energia de transmissão para o

meio de comunicação . Em tais sistemas são utilizadas em geral antenas omnidirecionais, devido ao caráter aleatório da movimentação destas estações.

- . Utilização de frequência que favoreça a propagação do sinal no meio considerado.

III.3.2 - Robustez

Para caracterizar a robustez do equipamento torna-se necessária a realização de testes que simulem as condições de operação a que ele será submetido. Tais testes devem incluir testes de resistência (vibração, calor e umidade) e testes de imunidade (resistência à ruídos gerados internamente, que são devidos principalmente às interferências entre circuitos , à disseminação de sinais provenientes das linhas de alimentação e ao aquecimento [31]).

Podem ser utilizadas várias técnicas na redução das interferências entre circuitos nos equipamentos tais como o aterramento, o balanceamento de cargas e a filtragem. Já a influência de ruídos provenientes das linhas de alimentação pode ser evitada através do desacoplamento das fontes de alimentação e, se necessário, pela blindagem dos condutores , envolvendo-os em um plano terra (equipotencial) que evita a irradiação dos ruídos pelos estágios dos circuitos.

O ruído térmico é gerado pela movimentação desordenada de elétrons nos componentes resistivos dos circuitos, devido ao aquecimento dos mesmos. Pode ser evitado pela dissipação de calor, pela filtragem das linhas condutoras, pelo acoplamento entre os circuitos ou mesmo pelo controle da temperatura

ambiente.

III.3.3 - Tolerância à falhas

Para garantir a manutenção do enlace de comunicação em situações de falha nos equipamentos, os mesmos devem ser providos de proteção que permita a identificação dos pontos de falha e sua eliminação através da utilização de recursos alternativos.

As técnicas mais utilizadas na construção de equipamentos tolerantes à falhas são:

- . Utilização de recursos sobressalentes ('stand-by'), que possam atuar em caso de falha.
- . Utilização de recursos múltiplos, sendo comum a introdução de um circuito árbitro que, em caso de diferenças no comportamento dos recursos individuais, decide qual (ou quais) será utilizado.

Esta última técnica é bastante adotada no que se refere a captação dos sinais de rádio através do uso de antenas espaçadas por distâncias suficientes para a recepção de sinais ortogonais (não correlacionados) que são fornecidos ao árbitro para que este os opere de forma a gerar um sinal único, que pode tanto ser o mais forte (ou mais nitido) como uma composição dos sinais envolvidos. Tal princípio é conhecido como diversificação espacial, sendo que o espaçamento entre as antenas é tão menor quanto maior a frequência utilizada (da ordem de meio comprimento de onda do sinal).

III.3.4 - Receptividade

Para que as informações transmitidas no sistema sejam interpretadas nos seus pontos de destino, o equipamento receptor deve ser capaz de detectar e amplificar o sinal transmitido e discriminá-lo dos ruídos e interferências associados, sejam eles internos ou externos.

Desse modo, para que a qualidade de recepção possa ser otimizada, devem ser considerados alguns pontos principais, a saber:

- . Eficiência da antena receptora, traduzida por sua seletividade e aproveitamento do sinal considerado (atenuação mínima).
- . Suscetibilidade do circuito receptor, caracterizada por seu fator de rejeição a ruídos, principalmente na fase de amplificação do sinal.
- . Filtragem do sinal.
- . Eficiência na demodulação e decodificação do sinal, evitando a inserção de atrasos e erros na interpretação da informação.

Existem, entretanto, limitações no desenvolvimento de receptores para sistemas móveis que devem também ser consideradas, como o tamanho permissível das antenas em unidades móveis.

III.3.5 - Facilidade de operação e manutenção

Para que um sistema de comunicação seja bem utilizado e apresente o maior tempo possível de operação, o mesmo deve ser projetado de forma a facilitar os procedimentos operacionais e permitir uma rápida manutenção ou mesmo reposição caso ocorram defeitos.

Considerando-se as características de formação profissional dos operadores dos equipamentos, a interface com o usuário dos mesmos deve ser simplificada ao máximo, principalmente através de um desenho industrial bem elaborado e do acesso facilitado às suas funções, como por exemplo através de uma sinalização simples e objetiva de teclas funcionais.

Já a manutenção do sistema deve ser facilitada através da implementação modular do mesmo, facilitando a identificação e substituição de partes defeituosas ou mesmo alterações de projeto para adaptação a situações específicas, sejam elas de caráter funcional ou operacional.

III.3.6 - Custos e benefícios

Na definição de um sistema de comunicação, um dos principais fatores considerados é a relação entre custo e benefício. Uma das fórmulas adotadas para a obtenção de maiores retornos sociais é sua aplicação em áreas de alta densidade demográfica. Para uma avaliação prévia dos custos envolvidos podemos dividi-los nas seguintes classes:

- . custos de projeto;
- . custos de implantação;
- . custos de manutenção;
- . custos de operação.

Note-se que, de acordo com o crescimento do sistema e com o conseqüente aumento na sua utilização, devem ser considerados custos adicionais em todas as formas mencionadas, o que leva à adoção de um projeto que admita evoluções sem se tornar obsoleto, fato que implicaria em novos investimentos no desempenho de antigas funções.

III.3.6.1 - Custos de projeto

Envolvem basicamente os recursos humanos e de equipamentos utilizados na fase de projeto, sejam na forma direta (projetistas, equipamentos de telemedição, recursos computacionais para cálculo e simulação, etc.) ou indireta (operadores, transportes, etc.).

III.3.6.2 - Custos de implantação

Os custos de implantação dependem fundamentalmente da abrangência do sistema, seu nível de serviço e complexidade. Nesse escopo, os fatores que influenciam na determinação destes custos são:

- . Tipos das estações consideradas (fixas e móveis), que variam principalmente em relação à confiabilidade (nível de serviço) da comunicação, de acordo com incrementos na sensibilidade de recepção, controle do enlace, confiabilidade das mensagens (na forma de codificação/

decodificação para controle de erros), resistência às condições adversas na operação , adoção de recursos de reserva e potência das unidades transmissoras.

- . Tipos das conexões envolvidas, sejam elas na forma de enlaces de rádio difusão ou conexões a cabo, sendo que a configuração escolhida depende basicamente das distâncias a serem cobertas e das características das estações (fixas ou móveis), além do relevo considerado. Por simplicidade deve ser estudada a viabilidade de conexões envolvendo serviços já existentes, como conexão de estações base através da rede pública de telefonia.
- . Grau de processamento requerido nas unidades fixas e móveis, seja ele utilizado somente para controle do canal de comunicação (manutenção do enlace, controle do nível de erros), como para gerenciamento e consulta do sistema em unidades principais (na forma de bancos de dados) , rastreamento de unidades móveis , roteamento de mensagens, comutação de canais, etc.
- . Recursos humanos envolvidos.

III.3.6.3 - Custos de operação

Envolvem fundamentalmente os custos de equipamento (consumo de energia, depreciação) e de pessoal envolvido.

III.3.6.4 - Custos de manutenção

Tais custos devem considerar gastos com manutenção de equipamento e de conexão , seja ela preventiva ou corretiva. A manutenção do equipamento deve considerar não só sua integridade física,mas também sua capacidade computacional (como por exemplo, organização de base de dados).

CAPÍTULO IV

Projeto do sistema

Após a definição dos fatores ambientais e dos parâmetros que devem ser considerados para a criação de um sistema adequado às necessidades dos usuários, o próximo passo deverá ser o projeto do sistema propriamente dito. Desta forma, nesta etapa deverão ser consideradas, além dos aspectos tecnológicos e econômicos, as regras impostas por órgãos federais e internacionais, bem como recomendações que visem a adoção de serviços confiáveis e compatíveis com os diversos sistemas de comunicação existentes.

Os próximos itens procurarão então descrever de forma ordenada os passos envolvidos na elaboração do projeto de um sistema de comunicação para aplicações em telemedicina, devendo ser apresentadas opções de projeto de caráter genérico e escolhidas aquelas que melhor se adaptem ao ambiente de aplicação considerado, sendo as mesmas destacadas do texto para melhor compreensão.

IV.1 - Níveis de confiabilidade

Em sistemas digitais de comunicação uma das formas de se definir a confiabilidade é através da incidência de erros nas mensagens durante a transferência de informação, utilizando como referência a proporção entre os fragmentos de mensagem com erros e a totalidade da mensagem durante determinado período, proporção esta denominada BER ('bit error rate'). De acordo com o tipo de sinal considerado, a incidência de

erros tem efeitos maiores ou menores, devendo então serem impostos limites distintos na obtenção da qualidade de serviço requerida.

Por ser uma aplicação de telemedicina serão adotadas técnicas que permitam resguardar níveis máximos de confiabilidade. Segundo este critério, podemos determinar os valores máximos da taxa de incidência de erros (BER) para os diferentes tipos de informação envolvidos.

Para os sinais de voz digitalizada, a taxa de erros limite deve considerar a qualidade de voz requerida, já definida como situada a partir do grau 3 na escala MOS. Note-se que a definição da taxa de erros não deve considerar os efeitos da codificação/decodificação na qualidade do sinal de voz, sendo relacionada unicamente com as condições do canal de comunicação. HOYLE [20] apresenta um estudo comparativo entre métodos de codificação digital de voz, sendo que os níveis de qualidade de voz obtidos para alguns métodos associados a canais com incidência de erros agrupados ou isolados da ordem de 8×10^{-3} BER (8 erros em média por cada 1000 bits transmitidos) se situam aproximadamente no grau 3 MOS, sendo as transmissões realizadas a uma taxa de 16,0 Kbps.

Num ambiente de incidência controlada de erros, a baixa frequência dos sinais de biometria permite que sejam interpretados valores espúrios se estes se situarem fora de uma faixa razoável de tolerância. Se tolerarmos então a ocorrência de uma medida errada em cada conjunto de 100, teremos, para a escala de representação adotada, uma taxa de erros (BER) da ordem de $1 / 12,5$, ou 8×10^{-2} . Note-se que

as baixas taxas de transferência envolvidas permitem que seja utilizada alguma forma de redundância temporal no canal de comunicação que diminua a ocorrência de erros para os sinais considerados.

Já para as informações de texto podem ser utilizadas formas de codificação que auxiliem na interpretação correta das informações, como a transmissão de algarismos em sua forma extensa. Podemos assim considerar as taxas de erro normalmente envolvidas em sistemas de comunicação comerciais, com a possível aplicação de alguma forma de redundância (também facilitada pela baixa taxa de transferência envolvida) que diminua a vulnerabilidade á erros . Estas taxas podem então se situar numa faixa de 1×10^{-2} BER . Neste nível pode ser mantida também a incidência de erros na transferência de imagens digitalizadas, sendo que a natureza estática das imagens permite que sejam utilizadas técnicas de construção gradual , funcionando como uma redundância opcional que pode ser permitida por um determinado período ou até a obtenção do grau de qualidade desejado.

Portanto , se considerarmos que neste sistema os vários tipos de informação são encapsulados em um pacote único para transmissão pelo canal de comunicação, podemos tomar como valor limite para a incidência de erros na mensagem o menor valor dentre os requeridos para as diferentes informações componentes desta mensagem . Dessa forma chegamos a um valor máximo para a taxa de erros no canal de comunicação da ordem de 8×10^{-3} BER, equivalente ao valor definido para a voz digitalizada.

IV.2 - Freqüência de operação

A seleção da faixa de freqüência utilizada na elaboração de um sistema móvel de comunicação deve considerar alguns fatores de maior influência no desempenho obtido por esta faixa dentro do ambiente considerado, a saber:

- . Propagação - a determinação do nível de sinal disponível para recepção a certa distância da fonte transmissora varia com o tempo e com a localização das estações, o que torna necessário o uso de técnicas estatísticas para o levantamento das curvas de variação do sinal. Estas variações são devidas à propagação dentro do ambiente considerado, e seguem uma distribuição log normal. DUFF [16] estabelece como fator preponderante de atenuação em distâncias de até 1,6 km o efeito da propagação de espaço livre e a partir daí até distâncias de 80 Km sugere a adição do efeito da propagação de terra plana. Para distâncias superiores a 80 Km, a dispersão troposférica também começa a ter influência significativa. Os efeitos das imperfeições no relevo são importantes e deve-se considerar que tornam-se mais pronunciados quando se eleva a freqüência de operação. Tais efeitos entretanto podem ser combatidos com eficiência razoável através da adoção de técnicas auxiliares, como a diversificação espacial para a propagação por multicaminhos e uso de elementos indutivos para simular um aumento no comprimento das antenas, o que diminui o efeito da atenuação por sombras. Como informação complementar pode-se ainda considerar uma

média de atenuação em ruas de grandes cidades em torno de 30 dB para a faixa de 40 a 150 MHz (causada basicamente pela interposição de estruturas) e um crescimento proporcional à frequência nos efeitos de atenuação pela interposição de folhagens , cuja incidência é mínima na faixa de 40 MHz e cresce para 10 dB a 150 MHz, 30 dB a 450 MHz e chega a 40 dB a 900 MHz.

- . Ruidos - as fontes de ruído preponderantes na determinação do desempenho do sinal na faixa de frequências analisada devem ser as artificiais, principalmente o ruído gerado por ignição automotiva . O ruído atmosférico em geral se apresenta a níveis abaixo do próprio ruído térmico gerado no receptor nas aplicações de comunicação móvel , o que praticamente elimina seus efeitos.
- . Características do equipamento - as maiores limitações impostas pelos equipamentos utilizados em sistemas de comunicação móvel dizem respeito à potência disponível para transmissão, principalmente nas estações móveis . Tal fato implica na necessidade de adoção de elementos (para otimizar a transferência de energia para o meio de comunicação) que são obtidos mais facilmente nas frequências superiores devido ao maior ganho disponível nas antenas e pela redução do tamanho necessário para sua construção . Em contrapartida , a sensibilidade na recepção cai com o aumento da frequência , podendo porém tal efeito ser mascarado em ambientes com grande incidência de ruídos . O

custo do equipamento também deve ser avaliado , pois o mesmo cresce em proporção direta com a elevação da freqüência de operação, podendo chegar a um aumento de 50% para a faixa de 900 MHz em relação á de 50 MHz.

Considerando os aspectos mencionados nos itens acima podemos partir para a determinação das freqüências de operação do sistema, devendo ser levados em conta a necessidade de comunicação bidirecional, devido á necessidade de comunicação de voz ou texto entre os operadores, e as características desejáveis ao sistema, bem como as encontradas no ambiente de aplicação.

Se considerarmos que o pior caso seja uma estação base localizada no centro do município e que deva realizar a cobertura total da sua área, as maiores distâncias envolvidas serão da ordem de 40 Km. Para este tipo de sistema , se fosse avaliado somente o efeito da atenuação sofrida pelo sinal em sua propagação, deveríamos considerar o fato de que quanto menor a freqüência do sinal, menores os efeitos da atenuação por propagação de espaço livre. O relevo envolvido é bastante acidentado, e nesses casos deve ser considerado o desempenho do sinal em relação ás obstruções e aos multicaminhos de propagação por elas determinados. Os sinais de baixa freqüência se apresentam melhor em relação a estes fatores, pela maior facilidade de contornar os obstáculos e pelo maior espaçamento entre os pontos de mínimo numa distribuição de Rayleigh. Note-se entretanto que esta última característica pode ser contestada se é utilizada por exemplo a diversificação espacial na recepção, pois freqüências maiores permitem que a distância necessária entre as antenas

receptoras para a interpretação de sinais ortogonais seja menor.

A incidência de ruídos no ambiente torna-se um fator preponderante se considerarmos que a propagação se dá em áreas predominantemente urbanas e suburbanas, devendo então serem evitadas as frequências mais vulneráveis a este tipo de interferência. Tal fato sugere a adoção de frequências acima de 50 MHz, principalmente se considerarmos o caráter emergencial da aplicação. As características operacionais dos equipamentos utilizados devem impor um limite superior para a frequência de operação pelos custos envolvidos, sendo que para o sistema este limite se situará na faixa de 450 MHz. É desejável então a adoção de uma frequência de operação com utilização mais difundida entre os fabricantes de equipamento, dentro da faixa de 50 MHz à 450 MHz.

DUFF [16] sugere, para os sistemas de rádio utilizados em ambientes onde as condições de difusão situam-se a níveis médios de ruído e com distâncias envolvidas de até 48 km, a adoção de uma banda entre 100 e 200 MHz. Se considerarmos que esta é uma faixa de frequências bastante utilizada (o que diminui os custos pela compatibilidade com equipamento existente) e que permite dimensões menores para as antenas envolvidas (para 100 MHz, meio comprimento de onda tem valor aproximado de 1,5 m), podemos optar por valores para a frequência de operação reservados para uso emergencial dentro desta faixa. Tais valores podem se localizar, de acordo com a ITU (International Telecommunications Union), dentro das seguintes faixas (frequências em MHz):

150,98	-	151,49
153,7325	-	154,46
154,6275	-	156,25
158,7	-	159,48
162,0	-	172,4

Entretanto, a consideração inicial de uma área de 40 Km de raio coberta por uma única estação fixa é bastante ambiciosa, principalmente pelo caráter bidirecional da comunicação, que exigiria que o sinal gerado por uma estação móvel cobrisse esta distância dentro do ambiente de propagação considerado.

Dessa forma, torna-se necessária a adoção de uma arquitetura diversificada, onde um número maior de estações base ou repetidoras reduza as distâncias envolvidas na comunicação, tornando mais favorável a utilização das faixas de frequência superiores (que obtém melhor desempenho quando as distâncias diminuem). Tal diversificação pode sugerir de imediato uma melhor adaptação da comunicação às condições ambientais, pela utilização de faixas superiores de frequência em lugares com alta incidência de ruídos e de faixas inferiores em lugares onde as fontes de ruído sejam mais esparsas. Devemos considerar entretanto as limitações operacionais dos equipamentos envolvidos, pois a comutação entre frequências separadas por distâncias consideráveis em relação aos seus comprimentos de onda devem requerer alterações bastante profundas nas características dos circuitos, como por exemplo no comprimento das antenas, bem como incorrer numa maior complexidade e, por conseguinte, maior custo destes equipamentos.

Para simplificação, podemos considerar a escolha de uma determinada faixa que possa abrigar um número razoável de canais de comunicação, de forma a possibilitar, caso se mostre necessária, a adoção de canais diferentes de comunicação entre fontes transmissoras dentro do sistema cujas freqüências de operação mantenham uma boa aproximação entre si (para minimização dos efeitos de comutação). Dessa forma, podemos definir a utilização da faixa de freqüências situada entre os limites de 156.25 MHz e 154.6275 MHz, perfazendo um total de 1,6225 MHz disponíveis para os canais de comunicação.

IV.3 - Método de modulação

Os métodos de modulação da informação digital são baseados nos três métodos tradicionais de modulação da informação analógica, que são a modulação AM (por amplitude), FM (por freqüência) e PM (por fase) . Desse modo surgem, em igual número, os métodos básicos de comutação digital : ASK (comutação por deslocamento de amplitude), FSK (comutação por deslocamento de freqüência) e PSK (comutação por deslocamento de fase) . CLARK [9] demonstra que os sinais ASK e FSK são, na verdade, composições que envolvem sinais PSK e sinais não modulados . Isso contribui para que sua tolerância aos chamados 'ruídos brancos' (com distribuição espectral Gaussiana) seja de 3 dB abaixo da tolerância encontrada no sinal PSK correspondente, pois somente metade de sua potência é utilizada na detecção dos dados (o sinal não modulado adicionado não contribui para a mesma) . Tal consideração é importante se levarmos em conta que o fator de desempenho habitualmente utilizado na medida do desempenho de

dispositivos receptores é sua imunidade a este tipo de ruído , pela facilidade de formulação teórica e simulação que apresenta em relação a outros tipos de ruído. Note-se, entretanto, que uma avaliação mais real deve considerar também o desempenho frente a problemas de 'fading' e interferência co-canal.

Atualmente as técnicas de modulação baseadas na comutação de amplitude (ASK) são pouco utilizadas em ambientes de acentuada instabilidade no caminho de propagação dos sinais, devido principalmente à sua baixa imunidade a ruídos. Assim, a análise constante neste trabalho se limitará à avaliação do desempenho das técnicas restantes (PSK e FSK) e suas derivações nestes ambientes.

IV.3.1 - Modulação baseada em FSK

Uma das principais vantagens no uso de técnicas baseadas na modulação por frequência (FSK) para a transmissão digital é a compatibilidade com os equipamentos atualmente utilizados na transmissão de voz , cuja disponibilidade e confiabilidade são bastante satisfatórias neste tipo de aplicação . Nos sistemas mais simples, um modem digital manipula o sinal em banda base para aproximar suas características às de um sinal analógico de voz, injetando-o então em um transceptor FM padrão , o que torna a interface com o equipamento transmissor bastante simples.

Entretanto, apesar de sua simplicidade, tais sistemas apresentam grandes desvantagens por não explorarem as possibilidades de incremento na eficiência advindas do uso da trans-

missão digital. Uma das principais melhorias decorrentes da utilização de tecnologias mais apropriadas é a diminuição da faixa de frequências utilizada na transmissão. Uma das técnicas que possui tal capacidade é o MSK ('Minimum Shift Keying ') , que mantém um deslocamento mínimo da ordem de $f_m = h/T$ (Hz) , onde h é o índice de modulação (0,5 para MSK) e T é o período do sinal em segundos. Tal deslocamento permite que os sinais de diferentes frequências que compõem o sinal transmitido sejam suficientemente ortogonais (isto é, não sejam fortemente correlacionados) para que sua detecção seja feita sem maiores problemas.

Os sinais MSK podem também utilizar dois ou três valores diferentes de deslocamento de frequência (diferentes valores para h), modificando este valor de um elemento de sinal para o outro [9] , possibilitando um ganho significativo em tolerância a ruídos seletivos em relação a outros métodos (4 a 5 dB em relação á PSK binário) ao custo de uma maior complexidade.

Uma evolução de técnicas MSK é a adoção de uma filtragem no sinal modulado para a eliminação de uma parcela do ruído branco , que por seguir uma distribuição Gaussiana dá a esta técnica o nome de GMSK ('Gaussian Filtered MSK') [28].

Outra técnica que merece ser mencionada é o TFM ('Tamed FM'), onde é mantido o controle rígido da função de variação (continua no tempo) da fase do sinal através de um filtro de pré-modulação [8] . Com este controle podem ser adotados espaçamentos entre canais de até 15 KHz (em contraste com os espaçamentos de 25 KHz usualmente tidos como mínimos) na

transmissão de voz. Tal controle de variação é importante se considerarmos que um dos problemas na utilização de sinais FM é o chamado 'ruído FM', ocasionado pelos desvios de fase proporcionados pelo movimento do veículo (efeito Doppler).

IV.3.2 - Modulação baseada em PSK

Como foi descrito, o sinal PSK pode ser considerado o sinal básico na formação dos sinais ASK e FSK e, além da vantagem decorrente da utilização plena de sua potência na transmissão da informação, apresenta um bom desempenho em relação à interferências e atenuações com características seletivas quanto à frequência, como o 'fading', a interferência co-canal e o deslocamento Doppler. Tal fato torna bastante atraente sua adoção em sistemas de terminais móveis.

Entretanto, devido a existência de variações de fase introduzidas no caminho de propagação do sinal, torna-se complexa a geração de um sinal de referência na recepção. Tal fato pode ser contornado pela adoção de modulação PSK diferencial, onde a informação é retirada da variação de fase relativa ao elemento de sinal anteriormente recebido, e não em relação a um valor absoluto. Como, em geral, tais sinais transmitem informações binárias, tal técnica é também chamada BPSK (PSK binária), sendo que CLARK [9] utiliza os níveis de tolerância a ruídos de tais sinais como padrão comparativo na variação de outros tipos de sinal.

Outros tipos de modulação baseados na comutação da fase podem ser obtidos também pela adição de níveis de sinal ao

sinal original, podendo então cada elemento do mesmo representar diferentes símbolos. Pode-se destacar a modulação QPSK (PSK quaternária), onde o deslocamento máximo de fase é de 180 graus, e a modulação 'offset - QPSK', onde a duração dos elementos de sinal é reduzida à metade pela adição de dois sinais BPSK [9], reduzindo o deslocamento máximo de fase a 90 graus e, conseqüentemente, estreitando a faixa do espectro necessária à transmissão.

IV.3.3 - Avaliação

Para que possa ser estimado o desempenho dos métodos de modulação em um ambiente de aplicação específico, torna-se necessária a modelagem das condições de propagação encontradas neste ambiente, para que possam ser levantadas características como incidência de ruídos, taxa de ocorrência de 'gaps' devidos aos multicaminhos ('fading rate') e níveis de interferência, entre outros. Entretanto, a falta de recursos para tais levantamentos leva-nos a basear nossas conclusões em análises teóricas e em simulações e medidas experimentais relacionadas com outros ambientes e realizadas por diferentes autores, direcionando esta avaliação para os aspectos relevantes ao sistema considerado.

Na escolha do método de modulação apropriado ao estabelecimento de canais de comunicação por rádio devem ser considerados principalmente os seguintes fatores:

- . Utilização do espectro - devido ao grande congestionamento no espectro de freqüências disponível para comunicação por rádio nos dias de hoje, há um grande inte-

resse no projeto de sistemas que utilizem a menor largura de faixa possível para o desempenho de suas funções . Daí a grande disseminação dos chamados métodos de modulação de faixa estreita (' narrowband '), que ainda contribuem para a limitação dos efeitos de interferência entre os canais de comunicação e contribui de forma significativa para a aplicação e bom desempenho dos sistemas celulares .

. Eficiência espectral - também chamada de densidade de informação, refere-se ao número de bits que são transmitidos em um dado período de tempo por um canal de rádio com determinada faixa de passagem, sendo normalmente definida em bits/s/Hz. Uma forma bastante adotada para se incrementar a eficiência espectral de um canal é a adoção de modulação multinível , onde cada nível de modulação representa agora mais de um bit de informação . Note-se entretanto que a penalidade para este tipo de modulação é dada pelo decréscimo na sua imunidade às condições adversas no canal de comunicação se a faixa de passagem neste canal for mantida , pois as diferenças entre os níveis são reduzidas e as limitações tecnológicas para o grau de precisão do discriminador na recepção tendem a incrementar a incidência de erros . Uma possível solução para o problema seria o aumento da potência do sinal transmitido, caso não haja limitações operacionais e econômicas.

. Confiabilidade - representada pelo desempenho do método considerado frente às condições de instabilidade e interferência associados a sistemas móveis de comuni-

cação . É avaliada em termos da taxa de erro incidente no canal para determinadas condições de incidência de ruídos e interferência, bem como atenuação. Note-se que em sistemas de aplicação emergencial tal fator deve ser extremamente relevante, pois as informações transferidas podem ser de caráter vital para o usuário.

- . Complexidade e custo - a adoção de métodos simples e robustos é desejável num sistema onde incorram limitações econômicas e tecnológicas , como é o caso . Desse modo, é aconselhável a opção por tecnologias já bastante difundidas e com facilidades de implantação , desde que as mesmas permitam a realização do sistema dentro da capacidade e dos limites propostos.

Estabelecidos tais parâmetros, podemos então proceder a avaliação dos métodos de modulação apresentados. COUCH [11] apresenta uma tabela comparativa entre alguns métodos de modulação digital básicos onde são relacionadas a faixa de passagem requerida e o desempenho em relação aos erros incidentes , em presença de ruído branco aditivo ou Gaussiano (tabela IV.1).

Tipo de sinalização digital	Faixa mínima de freqüências requerida (R = bit rate)	Probabilidade de erro (S = Eb/N0)	
banda base unipolar	$\frac{1}{2} R$	$Q \left(S \sqrt{2} \right)$	
banda base bipolar	$\frac{1}{2} R$	$Q \left((2S) \sqrt{2} \right)$	
OOK	R	deteccção coerente	deteccção não coerente
		$Q \left(S \sqrt{2} \right)$	$\frac{1}{2} e^{-\frac{S}{2}}$, S > 1/4
BPSK	R	$Q \left((2S) \sqrt{2} \right)$	requer deteccção coerente
FSK	$2 f + R$, onde f é o deslocamento de freqüência	$Q \left(S \sqrt{2} \right)$	$\frac{1}{2} e^{-\frac{S}{2}}$
DPSK	R	não usada na prática	$\frac{1}{2} e^{-S}$
QPSK	$\frac{1}{2} R$	$Q \left((2S) \sqrt{2} \right)$	requer deteccção coerente

Tabela IV.1 - Comparação de métodos de sinalização digital (COUCH [11], tabela 7.1).

Para maior ilustração, é apresentada na mesma publicação a figura IV.1, com as curvas correspondentes de variação da taxa de erros com a relação E_b / N_0 (energia por bit por densidade espectral de potência de ruído) em decibéis.

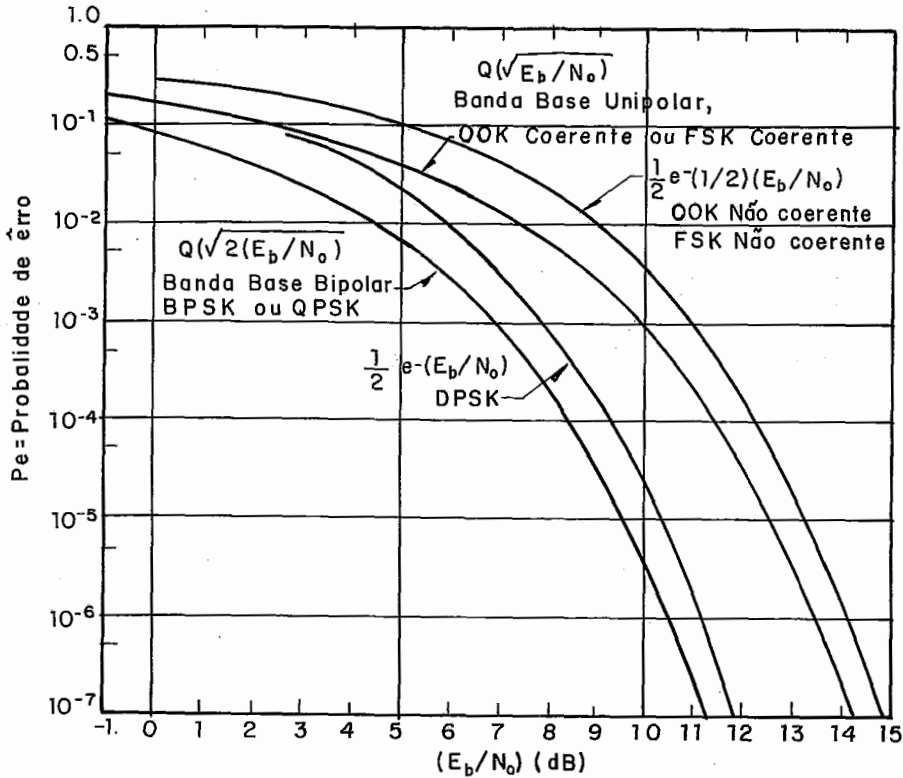


Figura IV.1 - Comparação da probabilidade de erros para vários métodos de sinalização digital (COUCH [11], figura 7.13).

Note-se que a relação E_b / N_0 pode ser relacionada com a relação de potência de sinal e potência de ruído (S / N) por:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \times \frac{B}{R} \quad (IV.1)$$

onde:

B faixa de passagem (Hz)

R taxa de transferência (bits/s)

ou em decibéis:

$$(E_b / N_0) \text{ dB} = (S/N) \text{ dB} + 10 \log_{10} B - 10 \log_{10} R \quad (IV.2)$$

Analisando os dados teóricos apresentados podemos determinar que:

- . Os métodos de modulação por fase se ajustam melhor que o método de modulação por frequência para o mesmo levantamento.
- . A faixa de passagem requerida para transmissão à taxa de transferência R em sistemas modulados é menor para os que se utilizam de métodos baseados em modulação por amplitude ou fase que para os baseados em modulação por frequência, sendo que para sistemas multinível (QPSK, por exemplo) a redução na banda é da ordem de $R / \log_2 m$, onde 'm' é o número de níveis. Note-se que este incremento na eficiência espectral deve ser acompanhado por um incremento na detecção do sinal, e que, para sistemas com modulação baseada em FSK e de faixa estreita, a impossibilidade na redução do desvio de frequência deve ser acompanhada pelo aumento de m vezes da faixa de passagem.

COUCH [11] apresenta também uma comparação entre os desempenhos de modulação FSK em ambientes com incidência exclusiva de ruído gaussiano e em ambiente onde também há atenuação por multicaminhos, representadas pela figura IV.2. Face à degradação acentuada observada, o autor sugere a adoção de métodos de diversificação para limitar os efeitos desta atenuação. Note-se que a fórmula para a probabilidade de erros é generalizada para qualquer sinalização binária ortogonal em canais com incidência de atenuação por multicaminhos, sendo participante desta classe de sinalização a que se utiliza de modulação DPSK.

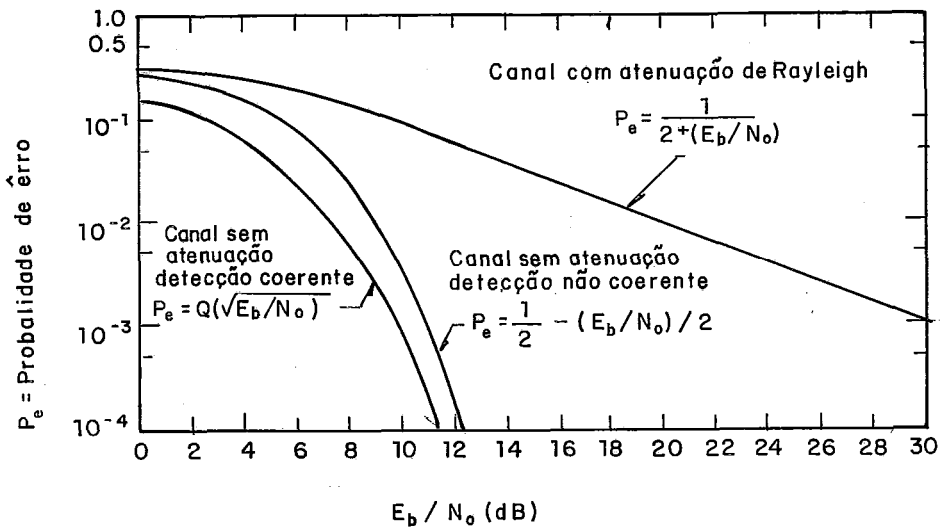


Figura IV.2 - Comparação de desempenho de recepção ótima para FSK em canais com e sem incidência de atenuação por multicaminhos (COUCH [11], figura 8-22).

Em uma publicação que se propõe a apresentar uma coletânea dos métodos de modulação digital disponíveis para o uso em sistemas terrestres de rádio móvel , CLARK [9] apresenta uma tabela comparativa da tolerância a ruídos para sinais binários utilizando os três tipos principais de modulação (tabela IV.2) , a qual possibilita também um levantamento do desempenho das técnicas de detecção apresentadas.

Método de modulação	Detecção coerente	Detecção não coerente
PSK	0	-1
ASK	-3	-4
FSK (h = 1)	-3	-4
FSK (h = 0,7)	-2	-5

Tabela IV.2 - Tolerância à ruídos de sinais binários
(CLARK [9], tabela 2).

Na mesma publicação [9] é apresentada uma outra tabela, que representa a tolerância a ruídos obtidos para vários tipos de modulação com sinais de envelope constante, numa medida comparativa em relação à modulação PSK (tabela IV.3). Note-se, entretanto, que os sinais FSK com modulação multinível apresentam as limitações de banda descritas e os sinais RC ('Raised-Cosine FM') requerem grande complexidade nos processos de detecção e sincronização no receptor.

Em suas conclusões, CLARK [9] diz haver determinado que as técnicas GMSK são preferíveis em ambientes pouco ruidosos, principalmente conjugadas a métodos de detecção coerente, podendo, entretanto, a degradação das condições de propagação e recepção tornar mais efetiva a adoção de técnicas de modulação FSK e PSK com multiníveis, sendo atraente a conjugação da última com algum tipo de detecção coerente de máxima verossimilhança ('maximum - likelihood') onde for viável a aplicação da detecção coerente.

! sinal !	! número de !	! índice de !	! vantagem sobre !
! !	! níveis m !	! modulação h !	! sinal BPSK, dB !
! MSK !	! 2 !	! 0,5 !	! 0,0 !
! GMSK !	! 2 !	! 0,5 !	! -1,0 !
! TFM !	! 2 !	! 0,5 !	! -1,0 !
! FSK !	! 2 !	! 0,715 !	! 0,9 !
! FSK !	! 4 !	! 0,914 !	! 3,3 !
! FSK !	! 8 !	! 0,964 !	! 4,9 !
! FSK !	! 16 !	! 0,983 !	! 6,1 !
! FSK !	! 32 !	! 0,992 !	! 7,0 !
! FSK !	! 4 !	! 0,444 !	! 2,6 !
! FSK !	! 8 !	! 0,444 !	! 4,3 !
! 1RC !	! 2 !	! 0,6 !	! 0,2 !
! 2RC !	! 2 !	! 0,8 !	! 1,2 !
! 3RC !	! 2 !	! 0,9 !	! 2,3 !
! 4RC !	! 2 !	! 1,1 !	! 3,0 !
! 6RC !	! 2 !	! 1,4 !	! 4,1 !
! 3SRC !	! 2 !	! 0,9 !	! 2,4 !
! 3RC !	! 4 !	! 1,3 !	! 5,0 !
! 3RC !	! 8 !	! 1,4 !	! 6,5 !

Tabela IV.3 - Tolerância á ruídos de vários sinais com envelope constante (CLARK [9], tabela 5).

PARSONS et alia [32] apresentam em seu trabalho uma análise comparativa das taxas de erros (teóricas e experimentais) para os métodos de modulação PSK, DPSK e FSK concluindo que a diferença no desempenho de modulação DPSK e FSK em ambientes severamente afetados por ruídos impulsivos é muito pouca.

YOSHIDA et alia [44] descrevem em seu trabalho os resultados obtidos através de medidas experimentais baseadas em um modelo de propagação que considera somente o sinal refratado diretamente e um único sinal refletido por estruturas, cujos parâmetros são obtidos por análise de 'eye pattern'. Suas conclusões refletem a superioridade de desempenho de sinais BPSK sobre os sinais QPSK, offset-QPSK e MSK em ambientes com severas distorções por multicaminhos, graças a degradação mais suave devida a não existência de interferência co-canal cruzada para este tipo de modulação.

Estas informações coletadas entre publicações de diferentes autores nos permitem avaliar os diferentes métodos de modulação em relação aos fatores de desempenho significativos no ambiente de aplicação de um sistema digital móvel para atendimento médico.

Como, entre os fatores de desempenho apresentados, o principal, pelas características do sistema, é a confiabilidade oferecida na troca de informações, podemos direcionar então neste sentido a análise dos métodos de modulação. Dentre as análises oferecidas pelos diferentes autores podemos então destacar que para ambientes com incidência do chamado ruído gaussiano os resultados obtidos para métodos de modulação baseados em FSK e em PSK apresentam diferenças bastantes suaves. Entretanto, quando se considera a adição dos agentes atuantes na degradação de um canal de comunicação que envolva estações móveis, alguns autores observam melhor desempenho nos métodos baseados em modulação por fase. Se observarmos que tais métodos são vantajosos também em relação à eficiência na utilização do espectro

(para faixa estreita a banda requerida por uma transmissão em FSK é duas vezes a requerida por uma transmissão em, por exemplo, DPSK), podemos adotar com maior segurança os métodos de modulação baseados na comutação de fase.

Entre os métodos baseados em PSK apresentados, podemos optar pela modulação DPSK pela sua maior robustez face às instabilidades do canal, sendo que a adoção de modulação multinível deve ser descartada para o sistema considerado pela maior complexidade requerida na construção do circuito detector e por representar um decréscimo na confiabilidade oferecida pela diminuição da robustez de sinal frente as condições desfavoráveis de propagação impostas pelo ambiente de aplicação e pela mobilidade das estações.

Podemos ainda obter alguns dados significativos para o projeto do sistema pela obtenção de valores quantitativos acerca do desempenho deste método nas tabelas e gráficos apresentados. Aplicando-se na figura IV.1 o valor definido no item IV.1 para o nível de confiabilidade requerido para os enlaces no sistema (8×10^{-3} BER), chegamos a um valor correspondente para E_b / N_0 em decibéis de aproximadamente 5 dB. Considerando a atuação da atenuação de Rayleigh através do gráfico apresentado na figura IV.2, pode-se determinar que a relação sinal/ruído deve ser mantida a um valor mínimo de 20 dB para a manutenção deste nível de confiabilidade.

IV.4 - Métodos de detecção

A detecção do sinal transmitido no receptor pode ser realizada de duas formas principais: coerente e não coerente.

A detecção coerente é realizada através da geração de um sinal de referência no receptor, cuja comparação com o sinal recebido possibilita a decodificação da informação transmitida. Sinais FSK de 'm' níveis podem ser detectados por 'm' sinais de referência com frequência e fase correspondentes aos 'm' tipos de elemento de sinal recebido, e sinais PSK de 'm' níveis podem se utilizar de duas referências em quadratura de fase (deslocadas de 90 graus) com a mesma frequência do sinal recebido para a detecção.

A detecção não coerente é baseada na medição da variação da portadora em um determinado elemento de sinal em relação ao elemento precedente. É um método de grande aplicação quando o sinal transmitido é submetido a condições desfavoráveis que degradam significativamente a recepção, impossibilitando o conhecimento prévio da fase da portadora e a geração de um sinal de referência. Os sinais FSK, por exemplo, podem ser demodulados em um discriminador, cujo sinal de saída é proporcional à frequência instantânea da portadora, e os sinais PSK podem fornecer a informação através da medida da variação média instantânea da fase do sinal recebido.

Um processo de detecção mais aprimorado, que pode entretanto significar um aumento na complexidade envolvida, baseia-se na aplicação de um algoritmo de máxima verossimilhança ao sinal que determina qual a possível seqüência de dados transmitidos que possui uma distância

euclideana mínima da portadora recebida. De acordo com CLARK [9], tal processo é bastante efetivo quando a dependência entre as formas de onda de elementos de sinal próximos é significativa, representando um incremento na tolerância a ruídos brancos de vários decibéis.

Na escolha do método de detecção apropriado devemos considerar principalmente seu desempenho associado ao método de modulação frente aos problemas existentes dentro do ambiente de aplicação, como sua simplicidade de implementação, visando redução de custos e facilitando a implantação, operação e manutenção do equipamento receptor. Através da figura IV.1, apresentada no item anterior, pode-se notar que os métodos de detecção coerente têm melhor desempenho que os de detecção não coerente em presença de ruído Gaussiano, ao custo de uma maior complexidade.

Em uma publicação orientada à descrição de um método de modulação 'tamed FM' generalizado, CHUNG [8] apresenta curvas de erros para vários métodos de modulação de banda reduzida, utilizando métodos de detecção não coerente e coerente em um canal com incidência de ruído branco. Entretanto, o desempenho obtido usando detecção coerente, que demonstra ser melhor, é bastante degradado com a adição de atenuação por multicaminhos ('fast fading'), o que leva o autor a concluir que os receptores não coerentes obtêm um melhor desempenho em tais ambientes.

Para o sistema considerado, onde o canal de comunicação é significativamente degradado por atenuações, interferências e ruídos, pode-se pressupor como melhor opção o uso da

detecção não-coerente, onde não é necessária a geração de uma referência no receptor em que se baseia toda a discriminação de sinal. Tal fato implicaria no aumento da complexidade no circuito do receptor, sendo que o mesmo certamente teria seu funcionamento comprometido pelas instabilidades no sinal recebido através das contínuas correções impostas à geração desta referência.

IV.5 - Método de acesso

Devido à saturação do espectro de freqüências disponível para se realizar a comunicação através de enlaces de rádio, torna-se importante a adoção de modelos em que o canal é visto como um recurso a ser compartilhado por diferentes usuários. A utilização concorrente do mesmo exige que estes usuários adotem filosofias de acesso que permitam a manutenção de um nível de serviço satisfatório, sem incorrer em aumento significativo na relação custo/desempenho.

A evolução dos conceitos de distribuição da capacidade de um canal de comunicação entre diversos usuários resultou na adoção da comutação de pacotes, onde são utilizados segmentos de mensagem independentes entre si para a transferência da informação. Neste método, uma parcela de informação é encapsulada de tal modo que uma eventual corrupção da mesma por condições de instabilidade não exija a retransmissão ou manipulação do conjunto total para a recomposição da informação, mas somente da parcela corrompida. Dessa forma, em ambientes onde haja severas instabilidades nas condições de propagação é obtido um incremento significativo na eficiência da comunicação, pela diminuição do atraso

introduzido na recuperação de erros em informações de comprimento longo. Além disso, a cada um dos pacotes pode ser adicionada alguma informação que também lhe permita alguma independência no estabelecimento do caminho a ser percorrido pelos nós de uma rede de comunicação até a estação destino, aumentando a confiabilidade do sistema.

Para que possa ser feita uma avaliação das principais técnicas existentes, apresentaremos as mesmas de forma resumida, além de uma análise de sua efetividade em aplicações de comunicação envolvendo unidades móveis. Tal apresentação será baseada principalmente no resumo publicado por SCHWARZ [36].

IV.5.1 - Métodos clássicos

São em geral métodos de acesso onde a banda de comunicação é segmentada de forma fixa e utilizada de forma pré - determinada por cada usuário.

No método FDMA ('Frequency Division Multiple Access') a banda de frequências disponíveis é dividida em faixas distintas limitadas por bandas separadoras (para redução de interferência nas faixas adjacentes), que são alocadas para usuários fixos ou multiplexadas entre os usuários de um grupo específico.

No método TDMA ('Time Division Multiple Access') todos os usuários têm acesso à banda total de frequências, porém as transmissões só podem ser realizadas em determinados instantes por um determinado usuário.

No método SDMA ('Space Division Multiple Access'), canais de diferentes fontes são recebidos em regiões diferentes de uma antena receptora, podendo ser de mesma frequência. Entretanto pouco é conhecido sobre suas possibilidades de utilização em sistemas terrestres de unidades móveis, podendo-se prever problemas na complexidade do equipamento envolvido e no direcionamento da transmissão.

Há ainda o método CDMA ('Code Division Multiple Access'), onde os usuários têm acesso à totalidade da banda a qualquer instante, sendo este, entretanto, limitado a seqüências (códigos) distintas para cada usuário dentro de uma variação de tempo e/ou frequência. Tal método é também chamado de dilatação de espectro ('spread spectrum'). Graças ao avanço na tecnologia envolvida na sua implementação, sua utilização tem se tornado bastante atraente, principalmente se considerarmos que face ao caráter seletivo em relação à frequência de atuação por multicaminhos, a diversificação de frequências proporcionada por tal método dentro do canal de comunicação torna-o bastante resistente aos seus efeitos. Entretanto, no momento atual, a difusão tecnológica deste método ainda é bastante limitada, o que o inviabiliza em termos de complexidade e custo de equipamento envolvido na construção do sistema, reservando-lhe grandes possibilidades de aplicação em um futuro próximo.

Pode-se então concluir que o principal problema advindo da adoção dos métodos clássicos é a utilização ineficiente do meio de comunicação, pois as parcelas dos canais alocados para um usuário inativo, ou cuja demanda de recursos seja ou esteja a níveis bastante reduzidos, representam na verdade

recursos disponíveis não utilizados.

IV.5.2 - Métodos de contenção

São métodos onde o acesso é feito de forma randômica e independente do estado do canal, sendo que a confirmação da transferência da informação é baseada na existência de mensagens de retorno.

No método aloha a informação é transmitida de forma independente, com a retransmissão randômica no caso de colisões ou perda da informação (falta de mensagens de retorno - ACK's). Suas maiores vantagens são sua simplicidade e razoável eficiência em casos de pouco tráfego, além da compatibilidade com qualquer técnica de modulação. Entretanto, sua eficiência é limitada com o aumento de tráfego de informações, o que diminui em muito a vazão do sistema. A vazão teórica máxima de sistemas que adotam esta metodologia é de $1/2e$ [22].

Uma forma de se aumentar a vazão obtida consiste em se limitar a transmissão ao início de segmentos de tempo da ordem do tempo de transmissão de um pacote de tamanho máximo (aloha segmentado ou aloha-s). Os transmissores devem então apresentar um sincronismo que possibilite uma segmentação equitativa para todos os terminais, e a retransmissão, se necessária, é feita após um número randômico inteiro de segmentos. A vazão teórica máxima é aumentada por um fator de 2 (atingindo valores próximos de $1/e$ ou 37%), pois o período vulnerável a colisões é diminuído. Outro efeito favorável da sincronização é a suavização da degradação com o

incremento de carga no canal.

Entretanto, a necessidade de sincronização entre os usuários causa um certo crescimento na complexidade do sistema, principalmente se considerarmos as instabilidades envolvidas na comunicação, que dificultam a utilização de canais de temporização. Os dois métodos também apresentam uma fragilidade muito grande no que diz respeito a colapsos no sistema, onde acima de um certo valor de tráfego, a vazão cai para um patamar mínimo, de acordo com NAMISLO [30].

Nas aplicações de terminais móveis, a vazão do sistema é acrescida devido a um tipo de diversificação proveniente das diferenças de potência nos sinais recebidos de diferentes transmissores, graças às diferentes distâncias cobertas pelos mesmos até a estação receptora, e aos efeitos de atenuação por sombras e multicaminhos. Tal característica possibilita o aproveitamento do efeito de captura na recepção, que faz com que o mais forte de um conjunto de sinais coincidentes seja interpretado em detrimento dos outros, o que permite que as colisões não destruam necessariamente todas as mensagens envolvidas, além de fazer com que a degradação devida ao aumento de tráfego (em termos de vazão e atraso na transferência por retransmissões) seja mais suave. NAMISLO [30] apresenta um sistema com 100 usuários com taxa de retransmissão fixa em 6% que obtém uma melhoria de 75% em relação aos valores de vazão teóricos. Cabe observar, porém, que na abordagem o autor ignora a perda de mensagens de ACK, o que é razoável se considerarmos o tamanho e a duração deste tipo de mensagem. Mas em sistemas com grandes taxas de erro seus efeitos devem ser objeto de análise.

Com o decorrer do tempo, foram surgindo variações destes dois métodos básicos. Tais variações procuram melhorar o desempenho destes métodos utilizando-se de uma organização mais rígida, através da atribuição de hierarquias e da miscigenação com outros métodos tradicionais. Mas estes métodos não tiveram uma grande aceitação e não encontraram aplicações práticas satisfatórias, principalmente pela baixa relação entre custo associado (na forma de complexidade de controle e atrasos adicionais) e desempenho.

IV.5.3 - Métodos com reservação

Nestes métodos o tempo de transmissão é dividido em duas partes distintas:

. O de reservação , onde as unidades que possuem algo a transmitir acessam de uma forma concorrente o meio para reservarem parcelas de tempo dentro do período de transferência de dados, utilizando-se para isso dos métodos básicos de contenção.

. O de transferência, onde as mensagens de cada terminal são transmitidas de acordo com as reservas feitas durante o período anterior.

Tais métodos preveem, em geral, que há uma estação centralizadora que confirma as reservações. Pode-se notar que seu grande mérito consiste em limitar o insucesso das transmissões de dados às atenuações características do sistema (multicaminhos, sombras, etc), sendo os atrasos de colisões limitados aos pacotes de reserva que, por serem pequenos, tornam seus efeitos bastante reduzidos. Entretanto,

sua complexidade é maior e existe ainda o problema do atraso adicional imposto pelas reservas quando o tráfego é menos intenso.

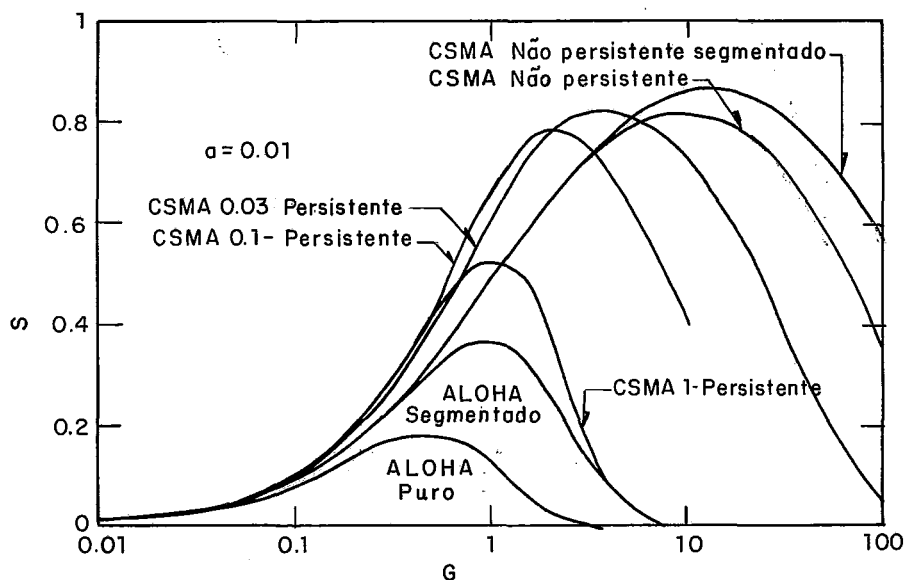
Existem ainda variações em torno deste método que tentam otimizar a vazão do sistema básico, explorando as vantagens de um método básico (como o aloha segmentado) em situações de pouco tráfego, e no caso de degradação devida a colisões, passam a adotar métodos de reservação que apresentem um melhor desempenho nestas situações [36]. Tais métodos implicam entretanto num aumento considerável da complexidade do controle sem apresentar ferramentas efetivas no combate às limitações impostas pela instabilidade do canal de comunicação. Tais limitações fazem com que o fato de ser reservada uma parcela de tempo para a transmissão de uma mensagem não garanta que esta seja realmente recebida, o que seria o grande trunfo de tais métodos.

IV.5.4 - Métodos de escuta

Os métodos de escuta permitem que uma estação, antes de se utilizar do canal de comunicação, teste-o com o objetivo de determinar se o mesmo já se encontra ocupado por transmissões de outra estação, sendo que este teste pode também ser feito em um canal de controle. A aplicação de tais métodos deve considerar a relação entre o tempo de transmissão dos pacotes e o atraso de propagação do meio, pois o período vulnerável a colisões (ditado pelo tempo de propagação) e os tempos de re-tentativa envolvidos podem degradar significativamente o sistema, principalmente em conexões de satélites. Desse modo, sua utilização nos

sistemas de rádio terrestres deve ser condicionada à obtenção de valores para estes atrasos que se situe dentro dos limites de desempenho considerados.

Tais métodos proporcionam um aumento significativo na vazão do sistema. Uma comparação entre alguns métodos de acesso de escuta e de contenção é apresentada na figura IV.3.



onde:

G média do tráfego total (nº de transmissões tentadas por período t , onde t é o tempo de transmissão de um pacote)

S vazão (nº de transmissões bem sucedidas por período t).

Figura IV.3 - Vazão para métodos de acesso randômico (atraso de propagação $a = 0,01$) (KLEINROCK [25], figura 5.58).

Nos métodos de escuta não persistentes, se a escuta revelar que o canal está ocupado, a estação tenta transmitir posteriormente. Caso contrário, transmite imediatamente. Existem ainda variantes que tentam diminuir a ocorrência de

colisões (causadas principalmente pelo tempo de propagação das mensagens) organizando o acesso em segmentos definidos de tempo.

Os métodos de escuta persistentes são similares aos métodos não persistentes, porém, se o canal está ocupado, o terminal espera que ele seja liberado, quando então transmitirá a mensagem; ou então esperará um certo tempo para transmitir (com probabilidade p), sendo que ao final do tempo de espera a decisão de transmissão ou nova espera é novamente feita (com a mesma probabilidade p). Note-se que a incorporação da persistência pode não implicar em melhorias significativas, se considerarmos a precariedade da monitoração do canal.

A grande desvantagem destes métodos é o aumento na complexidade do controle (escuta, retransmissão), devendo então ser considerada a capacidade de processamento de cada estação. Mas, sobretudo, o sistema apresenta uma vulnerabilidade muito grande às condições do ambiente de propagação, pois o início de uma transmissão no meio não garante que esta seja bem sucedida, podendo até se tornar intolerável o nível de retransmissão (baixa eficiência). Os métodos que usam segmentação, apesar de obterem melhorias na vazão, necessitam de sincronização entre as estações envolvidas.

A utilização destes métodos em sistemas com terminais móveis por rádio apresenta agravantes em relação aos problemas identificados, sendo que o nível de retransmissão pode ser diminuído com a adoção de diversificação no receptor, que

com a interpretação de algumas mensagens colididas aumenta a eficiência do sistema (beneficiando-se do efeito de captura).

Deve-se considerar, para os métodos de escuta em geral, a provável ocorrência de intervalos de falso silêncio durante a escuta devido às condições de atenuação do canal (devidas principalmente aos multicaminhos de propagação), sendo razoável a adoção de limites de tempo para a interpretação do canal desocupado, visando minimizar a probabilidade de colisões nestas situações. Este recurso pode, por outro lado, incorrer em atrasos (significativos ou não), que devem ser analisados para se dimensionar sua eficiência.

Uma forma efetiva de se combater os efeitos da instabilidade do canal é através da adoção da escuta de canais auxiliares ('Busy Tone Multiple Access' ou BTMA), onde a atividade subsequente (deferência ou transmissão) depende da detecção ou não de um sinal de ocupação.

A transmissão do sinal de ocupação pode ser feita exclusivamente por uma estação fixa, minimizando os problemas decorrentes da monitoração de um canal de comunicação instável, onde o transmissor pode não ter capacidade de transmitir um sinal suficientemente forte para superar as atenuações envolvidas (no caso das estações móveis). A ocupação de espectro pelos canais auxiliares pode ainda ser minimizada, se considerarmos que o sinal de ocupação pode ser codificado em dois ou mais estados. Entretanto, esta economia acarreta um aumento na capacidade de geração e interpretação do sinal e no tempo envolvido nesta atividade, sendo por isso importante uma análise de sua eficiência.

IV.5.5 - Avaliação

Após a apresentação dos principais métodos de acesso utilizados em sistemas de comunicação por canais de rádio, pode-se proceder à uma análise crítica de sua aplicabilidade no sistema considerado.

Os métodos que se utilizam de reservação não parecem oferecer soluções efetivas para os sistemas de comunicação móvel, em que se procura minimizar o atraso de transferência das informações (principalmente devido ao seu caráter emergencial), pois além de parcela significativa da transferência ser utilizada para a reservação, a sua base de aplicação, que é a transferência organizada das informações sem perdas por colisões, não é garantida dentro de um canal instável.

Os métodos básicos de contenção sem reservação (aloha e aloha-s), são atraentes pela sua extrema simplicidade, sendo que o método aloha-s é privilegiado pela maior vazão que permite. Os problemas decorrentes da sincronização podem ser amenizados com a adoção de um canal de sincronismo mantido com maior estabilidade pelas estações base. Sua vazão absoluta entretanto é baixa, mesmo considerando-se o efeito de captura na recepção (que a eleva a níveis em torno de 50%), devendo ainda ser considerada a espera nos intervalos entre os segmentos no cômputo do atraso envolvido na transferência, que em sistemas emergenciais deve ser reduzido a um patamar mínimo.

Os métodos de escuta têm a seu favor uma boa difusão tecnológica, graças à sua aplicação em sistemas de

comunicação por meios condutores. A competição pelo canal e seu resultado também são estimuladas pelo efeito de captura na recepção, o que possibilita a estes métodos um bom desempenho em relação à vazão das informações. Sua grande vantagem então, em relação aos métodos anteriores, é uma maior flexibilidade em relação à expansão do sistema. A adoção de canais auxiliares para o controle do acesso aos canais de comunicação contribui de forma significativa para a redução dos problemas decorrentes da instabilidade das condições de propagação dos sinais, permitindo a atuação de uma entidade centralizadora (a estação base) na disciplina de acesso, através de um sinal mais forte e de decisões baseadas na confrontação dos níveis de sinal recebidos das estações concorrentes no seu ponto destino. O fato deste controle ser realizado numa estação com maiores recursos alivia também certa carga de processamento e equipamento nas estações móveis. Sua maior desvantagem, a adição da faixa de controle ao espectro ocupado, pode ser bastante reduzida com a codificação para a realização de controle de diversos canais de comunicação, utilizando o máximo da capacidade disponível para o canal de controle. Entretanto, existe um valor limite para a codificação se considerarmos o atraso inserido para a decodificação e interpretação da ocupação de canal (tal atraso deve porém ter seus efeitos reduzidos pelo efeito de captura na recepção). A adoção de múltiplos canais também oferece uma boa opção, sob a forma de diversificação.

Dessa forma, considerando-se os métodos básicos pela sua simplicidade, sem portanto verificar com maior profundidade os chamados métodos híbridos, pode-se concluir pela

utilização de um método de acesso baseado na escuta de um canal auxiliar gerado nas estações base com as quais está estabelecida a comunicação, pela sua melhor adaptabilidade às condições de instabilidade do canal de comunicação.

Para que possamos então identificar o ponto ótimo de vazão que pode ser alcançado com a utilização deste método, e dessa forma estabelecermos limites para a quantidade de mensagens geradas para transferência no canal (que deve ser proporcional ao número de usuários ativos em um determinado momento para este canal), devemos tentar obter informações que nos permitam chegar a estes valores. Entretanto, a literatura consultada se limita a levantamentos de vazão de determinados métodos de acesso em situações com características diferentes das consideradas neste trabalho e sem considerar, por exemplo, a atuação de interferências, o que nos força a adotar alguns valores por aproximação. KLEINROCK [25] apresenta como forma de comparação entre diversos métodos uma tabela de capacidade que considera um atraso de propagação bastante alto (10% do tempo de transmissão de um pacote), sugerindo uma situação de pior caso, e que evidencia o melhor desempenho dos métodos de escuta. Além disso, na mesma publicação se conclui que o custo em termos de vazão e atraso graças aos chamados terminais escondidos em sistemas móveis é bastante pequeno para o método BTMA, em relação ao desempenho do método de escuta básico para sistemas fixos.

Adotando-se como máximo para o sistema um valor para o atraso normalizado de propagação de 0,01, valor que foi utilizado como referência para os levantamentos de desempenho

na publicação de KLEINROCK [21], podem ser determinados para este sistema alguns limites relacionados com o atraso de transferência da informação. Considerando-se que um pior caso para o comprimento do enlace de comunicação deva ser o de uma estação transmissora localizada no centro do município, que atenda a uma distância de cobertura de aproximadamente 35 Km, pode-se obter para esta situação o atraso de propagação associado, dado por:

$$ap = \frac{d}{c} \quad (IV.3)$$

onde:

ap atraso de propagação (segundos)
 d comprimento do enlace (metros)
 c velocidade de propagação no meio (3×10^8 m/s)

Tal cobertura admite então um atraso de propagação da ordem de 0,117 ms. Através da fórmula para o atraso normalizado de propagação [25] :

$$a = \frac{ap}{2t} \quad (IV.4)$$

onde:

a atraso normalizado de propagação
 ap atraso de propagação (segundos)
 t período de transmissão do pacote (segundos)

chega-se então, pela utilização do limite para o atraso normalizado de 0,01, a um valor mínimo permitido para o período de transmissão de um pacote de aproximadamente 5,85 ms, o qual deve servir para validar a definição da taxa de transferência para o sistema, em função do tamanho de pacote escolhido.

Pode então ser estimada a capacidade de transferência para um método BTMA através da figura IV.3, que admite um atraso normalizado de 0,01 , com a suposição de que o comportamento deste método com a utilização de escuta 0,03 - persistente (que apresenta boa vazão para cargas menores e uma degradação aceitável com o crescimento desta carga) e de um canal de ocupação otimizado (isto é, cujas características se adaptem corretamente ao ambiente considerado) se aproxime do comportamento de um método de escuta 0,03 - persistente puro, quando o canal sofre com a incidência dos efeitos de propagação. Arbitrando um valor aproximado para a carga G oferecida a um canal (número de tentativas de transmissão de pacotes a cada tempo de transmissão de pacote) em função do número limitado de usuários , mesmo contando com uma previsão de crescimento a longo prazo , podemos avaliar como um limite para a carga média em cada canal, em momentos de pico no tráfego de informações, um valor aproximado da unidade, ou seja, a cada tempo de duração de pacote no canal há uma tentativa de transmissão de pacote por parte de uma estação. Com este valor para a carga média aplicado á figura IV.6 na curva obtida para o método 0,03 - persistente, obtemos um valor correspondente para a eficiência do protocolo (S/G) no caso considerado de aproximadamente 60% , o qual será utilizado então como valor de referência . Note-se que, por simplificação, os efeitos do atraso inserido pela decodificação do canal auxiliar serão negligenciados, devendo porém ser feita uma ressalva se for adotada a solução de um canal auxiliar controlando dois ou mais canais de comunicação.

IV.6 - Formato de transmissão e tamanho dos pacotes

O formato de transmissão das informações em sistemas de transmissão de dados é fator básico em seu desempenho, pela eficiência e confiabilidade que proporciona aos serviços. Os parâmetros que devem ser considerados na escolha do formato apropriado são [24]:

- . capacidade de endereçamento;
- . eficiência;
- . capacidade de detecção/correção de erros;
- . capacidade de compartilhamento do canal;
- . flexibilidade.

A escolha do formato apropriado envolve características específicas dos sistemas considerados, como a extensão média das mensagens e sua frequência. O formato do quadro de sinalização para o sistema de telefonia móvel norueguês [42], por exemplo, não prevê a adoção de nenhum tipo de redundância visando o controle de erros, pois as mensagens são curtas e, por conseguinte, mais resistentes às condições adversas de propagação.

Entretanto, uma das grandes tendências nos sistemas de comunicação em geral é a adoção de formatos de quadro padronizados para a transferência de informação, possibilitando maior compatibilidade entre os equipamentos desenvolvidos. Desse modo, um caminho natural para a definição do formato de transmissão de um sistema móvel é a adoção de padrões já bastante utilizados por sistemas fixos, como o HDLC, que é um padrão de aceitação internacional (figura IV.4).

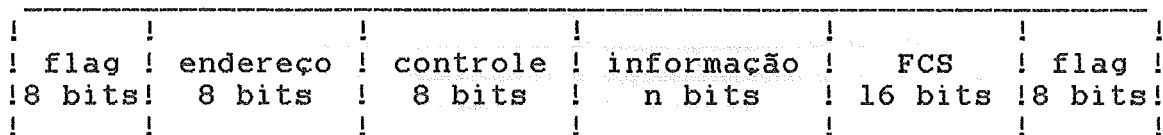


Figura IV.4 - Estrutura de um quadro HDLC.

Porém, a aplicação de formatos utilizados normalmente em sistemas de transmissão fixos não é a forma mais eficiente de se efetuar a transferência de informações em sistemas móveis, pois tais formatos não consideram a instabilidade do canal como fator crítico. Este fator entretanto é de suma importância, pois sua tendência de limitar o comprimento das mensagens circulantes reduz bastante a eficiência dos formatos tradicionais.

Desse modo, surgem algumas propostas de formatos específicos, como o apresentado por MABEY [27] e proposto pela 'Electronic Engineering Association' inglesa, onde as informações de endereçamento e controle são encapsuladas somente na primeira palavra de código da mensagem (figura IV.4), e as palavras de dados possuem comprimento fixo, sem a colocação de 'flags' entre as mesmas.

tamanho mínimo de transmissão

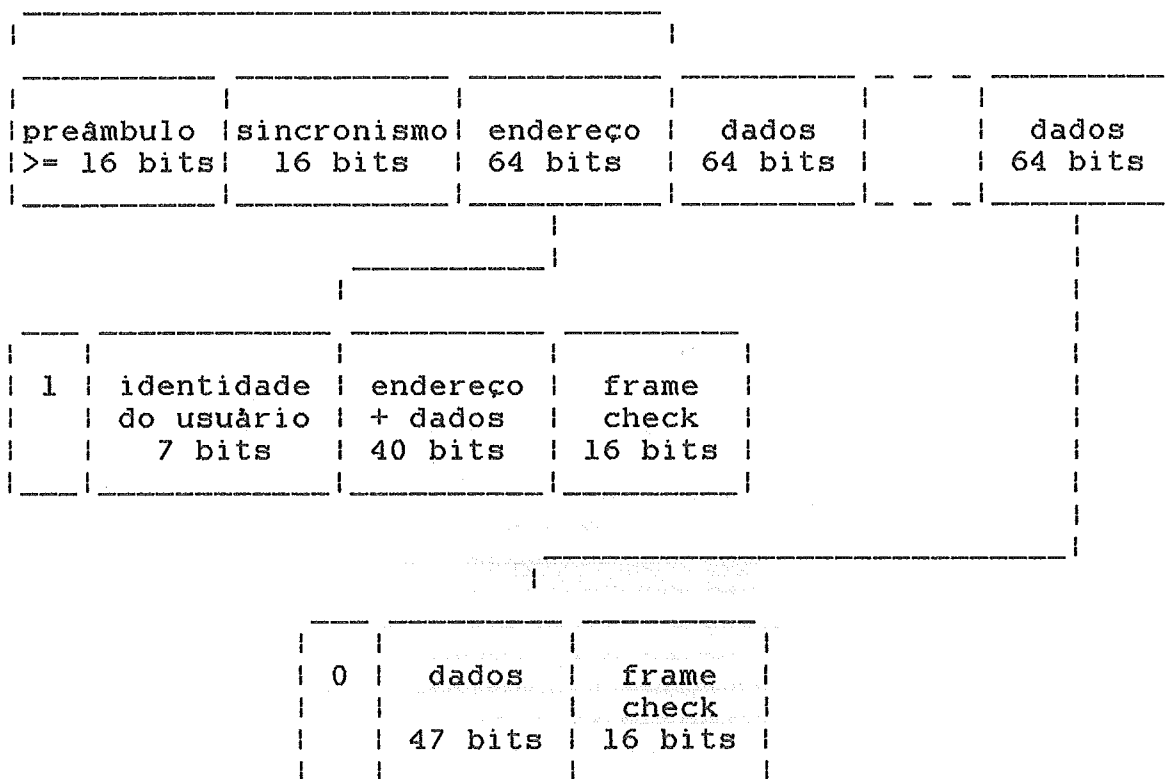


Figura IV.5 - Estrutura de um quadro EEA (MABEY [27],
figura 1) .

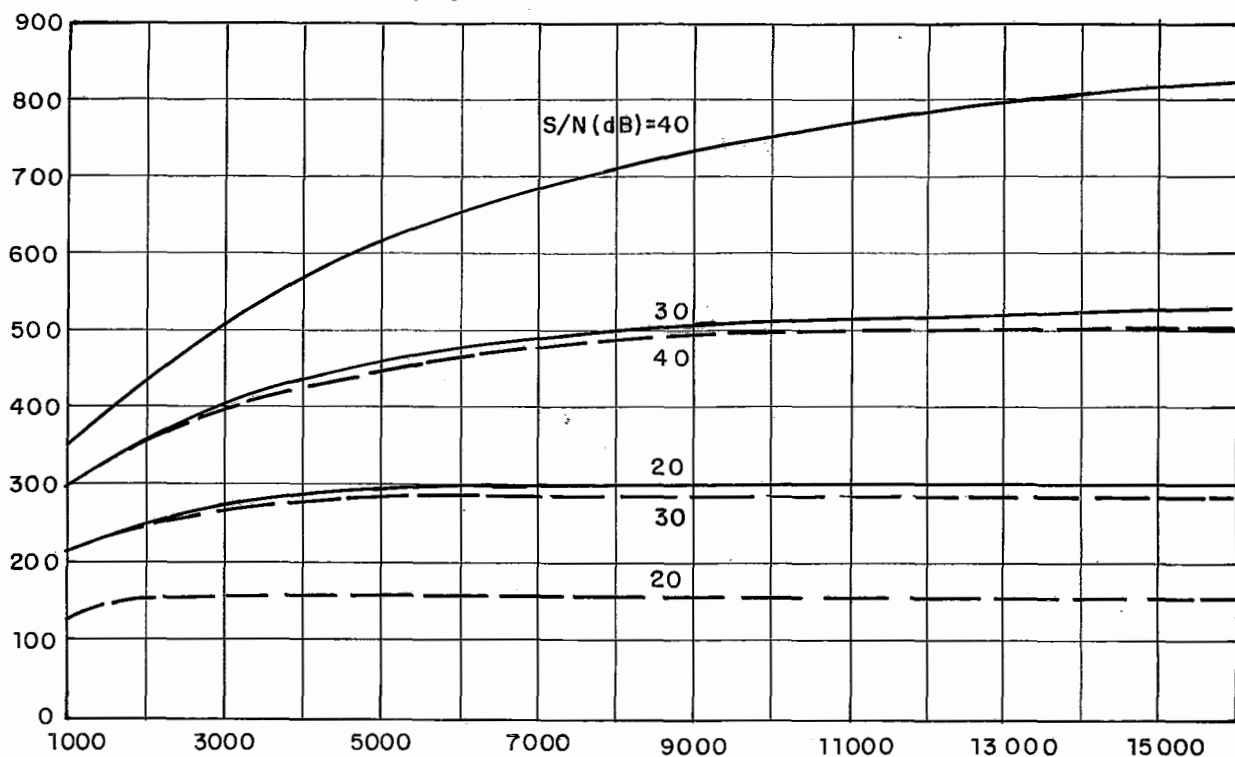
Através de uma análise comparativa pode-se concluir pela adoção do formato de transmissão proposto pela EEA e sugerido pelo CCIR (em suas recomendações [24]), através dos seguintes pontos:

- . A adoção de grupos de dados de comprimento fixo elimina a necessidade de inserção de palavras de sincronismo entre os mesmos, que são então substituídas por uma palavra de verificação de erros e um único bit de sincronismo, o que incrementa a confiabilidade das parcelas de dados componentes da mensagem.

. E um formato que procura maximizar a eficiência na transferência de mensagens em canais instáveis pela diminuição da parcela de controle voltada para obtenção de sincronismo e voltando-a para o controle de erros, o que aumenta o nível de confiança oferecido.

Com a adoção deste formato temos então que o tamanho dos pacotes a serem trocados entre os dois extremos no canal de comunicação deve depender das condições deste canal e da demanda de informações, sendo as parcelas de dados adicionadas em quantidades múltiplas de 64 bits à mensagem total de acordo com a necessidade. Para a determinação da eficiência do formato nesta aplicação, deve ser definido o tamanho de pacote utilizado pelo protocolo de comunicação. Note-se que a relação de eficiência é assintótica, tendendo a um limite superior de aproximadamente 0,73 com a adição de mais e mais segmentos de dados a um pacote.

Em um dos capítulos das recomendações do CCIR [23] é apresentada a figura IV.6, que representa a variação do comprimento ótimo de um pacote em relação ao tamanho médio da mensagem.

TAMANHO ÓTIMO DE PACOTE, B_0 BITS

TAMANHO MÉDIO DE MENSAGEM, BITS

FREQUÊNCIA 850 MHz

TAXA DE TRANSFERÊNCIA — 16.000 BITS /Seg

— 4.800 BITS /Seg

VELOCIDADE DO VEÍCULO : 50 km/h

Figura IV.6 - Tamanho ótimo de um pacote versus tamanho médio da mensagem ([23], Report 832, figura 2).

Se considerarmos um ambiente onde a relação sinal/ruído é a mínima considerada (20 dB) e com uma taxa de transferência de aproximadamente 16 Kbps vemos que o tamanho ótimo para um pacote se mantém estável no intervalo entre 200 e 300 bits. Dessa forma, em um sistema onde a taxa de transferência deva se situar acima dos 16 Kbps e onde as condições de comunicação sejam desfavoráveis, podemos extrapolar que a manutenção de um tamanho de pacote entre 400 e 500 bits seja razoável, possibilitando a inserção de sinais de sincronismo em intervalos menores e facilitando o processo de recuperação da detecção da mensagem em casos de erro. Será adotado então

um tamanho de pacote de 464 bits (composto pelas parcelas de sincronismo, endereço e mais seis parcelas de dados), que estabelece uma relação de eficiência para o formato de transmissão adotado na aplicação considerada em torno de 0,64.

IV.7 - Taxa de transferência

Com os dados levantados, pode ser avaliada a taxa de transferência mínima para a transmissão das informações no canal de comunicação . Através da tabela III.4 nota-se que é necessária para a transferência de todos os dados componentes das informações do sistema simultaneamente uma taxa da ordem de 23 Kbps. Se englobarmos na capacidade total requerida a reserva de uma parcela para a inserção de informações de controle da ordem de 10% da capacidade dedicada aos dados, teríamos uma taxa de informações circulantes da ordem de 25,3 Kbps. Note-se entretanto que ainda devem ser consideradas, para esta aplicação , a eficiência do formato de transmissão (0,64) e do método de acesso (0,60) utilizados, cujos valores conjugados fornecem um total aproximado de 0,384. Tal assertiva pressupõe a manutenção do nível de confiabilidade e da probabilidade de comunicação para a área coberta dentro dos limites estabelecidos previamente (8×10^{-3} BER para a taxa máxima de erros e 99% para o tempo provável de comunicação), cujos valores assume-se terem influência controlada na determinação da vazão global do sistema . Desse modo, teremos como necessária ao bom funcionamento do sistema uma capacidade de transferência mínima no canal de comunicação da ordem de $25,3 \text{ Kbps} \times 1/0,384 = \underline{66 \text{ Kbps}}$, para determinado usuário a

qualquer instante , valor que será utilizado como referência na seqüência do projeto.

Nesse ponto, deve então ser realizada uma verificação da obediência aos limites adotados para os atrasos envolvidos na transmissão dos pacotes pelo canal de comunicação, com vistas à validação dos valores considerados na definição do método de acesso utilizado no compartilhamento deste canal e no estabelecimento do tamanho destes pacotes.

No item IV.5 foi determinado um valor mínimo para o período de transmissão de um pacote de aproximadamente 5,85 ms . Considerando-se então a utilização de um tamanho de pacote de 464 bits e de uma taxa de transferência para o canal de 66 Kbps, tem-se que o período de transmissão de um pacote neste canal é de aproximadamente 7 ms , que não é inferior ao limite proposto, permitindo a conclusão pela propriedade dos valores obtidos em função dos limites impostos aos atrasos envolvidos na transmissão de informações para o sistema.

IV.8 - Nível de sinal requerido na recepção

Para que a incidência de erros na recepção da informação seja mantida abaixo do limite estabelecido para a manutenção do nível de confiabilidade nos canais de comunicação, torna-se necessária a adoção de formas eficientes de controle sobre os efeitos dos agentes interferentes atuantes no sistema, já que um controle direto sobre estes é praticamente impossível.

O próximo passo deve então consistir na avaliação do nível de interferência gerado na recepção pelas principais fontes de interferência atuantes no ambiente de aplicação, pois a forma mais simples e eficiente de se controlar seus efeitos é a adoção de um limite de rejeição no receptor que se não elimine pelo menos reduza tais efeitos nas situações mais críticas a níveis mínimos. Dessa forma, se garantirmos no projeto que o nível de sinal disponível na recepção se encontre o maior tempo possível acima deste limite, poderemos considerar uma probabilidade máxima de interpretação correta deste sinal. Note-se que mesmo os sinais interferentes cujo nível se situe acima deste limite mas abaixo do nível do sinal de informação recebido não prejudicarão a recepção.

Considerando as interferências significativas dentro do sistema, podemos avaliar então seus valores quantitativos em relação à faixa de freqüências utilizada e às características comumente disponíveis para os equipamentos receptores.

Para a avaliação da amplitude de ruído típica na recepção pelas estações componentes de um sistema móvel de comunicação, deveriam ser realizadas medições dentro do ambiente considerado, para o levantamento de uma distribuição estatística destes valores que permitisse a determinação de níveis médios para áreas específicas de cobertura. Entretanto, como tal levantamento requer recursos que no momento não nos são disponíveis, trabalharemos com valores de experimentos realizados por outros autores, onde seja mantida uma proximidade razoável entre as características do ambiente onde tais medidas foram realizadas e as encontradas na área

considerada. Note-se que, como o objetivo desta avaliação é a determinação de um limite de rejeição que cubra o pior caso encontrado, as situações consideradas deverão ser também de pior caso. Dessa forma, devemos então avaliar as condições de ruído encontrados nos pontos de recepção para os dois tipos de estação componentes do sistema (móveis e fixas).

Como a principal fonte de ruído em sistemas móveis é a inigção automotiva, podemos avaliar a sua influência pela fórmula II.4. Para tanto, devemos determinar os valores da taxa de tráfego de veículos (C) no ponto de influência (onde é gerado o ruído), a distância (R) envolvida entre o ponto de levantamento e o fluxo de veículos, e a banda de passagem do equipamento receptor, cobrindo sempre valores de pior caso. Se considerarmos uma taxa de carros representativa dos períodos de maior escoamento em uma via de tráfego intenso (100 veículos por minuto) podemos fazer inicialmente o cálculo para uma estação móvel a uma distância arbitrária de 4 metros de uma fonte de ruído. Baseando-se na relação $B_r = 2 \times R$ descrita em [6] (onde B_r representa a banda de passagem do receptor em relação à taxa de transmissão da informação digital R necessária), temos que para uma taxa de transferência requerida da ordem de 66 Kbps (envolvendo informações de voz, telemetria, texto, imagem e controle), que determina uma banda de passagem da ordem de 132 KHz, o valor correspondente para a intensidade média de ruído é de:

$$E_m = - 11 + 10 \log_{10} 132 + 17 \log_{10} 100 - 20 \log_{10} 0,4 \text{ (dBuV/m)}$$

$$E_m = 52 \text{ dBuV/m}$$

Para convertermos para uma unidade de potência poderemos utilizar a relação dada por [34] para uma antena casada:

$$E_{eq} = \frac{2 \sqrt{P \cdot R}}{h} \quad (IV.5)$$

onde:

E_{eq} campo de ruído equivalente (uV/m)

h altura da antena (m)

P potência fornecida à antena (W)

R resistência total da antena = resistência de entrada do receptor (ohms)

Se considerarmos a relação em decibéis, teremos que:

$$E_{eq} \text{ (dBuV/m)} - 120\text{dB} = 20\log_{10} 2 + P\text{(dBW)} + 10\log_{10} R - 20\log_{10} h \quad (IV.6)$$

Para uma antena de 1/2 onda em espaço livre, teremos [34]:

$$R \approx 73 \text{ ohms} \quad \text{e} \quad h = \frac{c}{2f} = 0,6 \text{ m}, \text{ para } f = 150 \text{ MHz}$$

Temos então que:

$$P_m \text{ (dBW)} = E_m \text{ (dBuV/m)} - 148,6 \text{ dB} = (52 - 148,6) \text{ dBW}$$

$$P_m \text{ (dBW)} = -96,6 \text{ dBW}$$

ou

$$P_m \text{ (dBm)} = -66,6 \text{ dBm}$$

Direcionando-se o cálculo para a determinação do nível de ruído devido à inigção automotiva nas estações base, podemos concluir que uma antena receptora situada a uma distância de aproximadamente 51 metros (por exemplo, uma antena situada a 50 metros do solo em uma estação a 10 metros do fluxo de veículos), que pode ser considerado como o pior caso, pode ter o nível de ruído incidente avaliado por:

$$E_b \text{ (dBuV/m)} = (-11 + 21 + 34 - 14) \text{ dBuV/m} = 30 \text{ dBuV/m}$$

ou

$$P_b \text{ (dBm)} = -88,6 \text{ dBm}$$

Outra fonte de interferência atuante em sistemas de rádio comunicação é a intermodulação, que é o principal causador da interferência entre canais adjacentes e se expressa pela potência equivalente obtida através da fórmula II.1. Tal interferência é fator fundamental na determinação do espaçamento entre canais nos sistemas de rádio comunicação digital. O CCIR [24] sugere para contornar seus efeitos a utilização de um valor de 1,5 para a diferença normalizada de frequência (a relação entre a diferença de frequência e a taxa de transmissão da informação). Dessa forma, com uma taxa de transmissão da ordem de 66 Kbps, a separação entre canais deverá ser da ordem de 99 KHz. Se considerarmos que a potência das fontes interferentes no ponto de recepção é equivalente, teremos pela aplicação da fórmula II.1:

$$PE = -93 + 3P_i - 60 \log_{10} [(132 \text{ KHz} + 99 \text{ KHz}) \times 100/150 \text{ MHz}]$$

$$PE = 3P_i - 44 \text{ (dBm)} \quad (\text{IV.7})$$

onde:

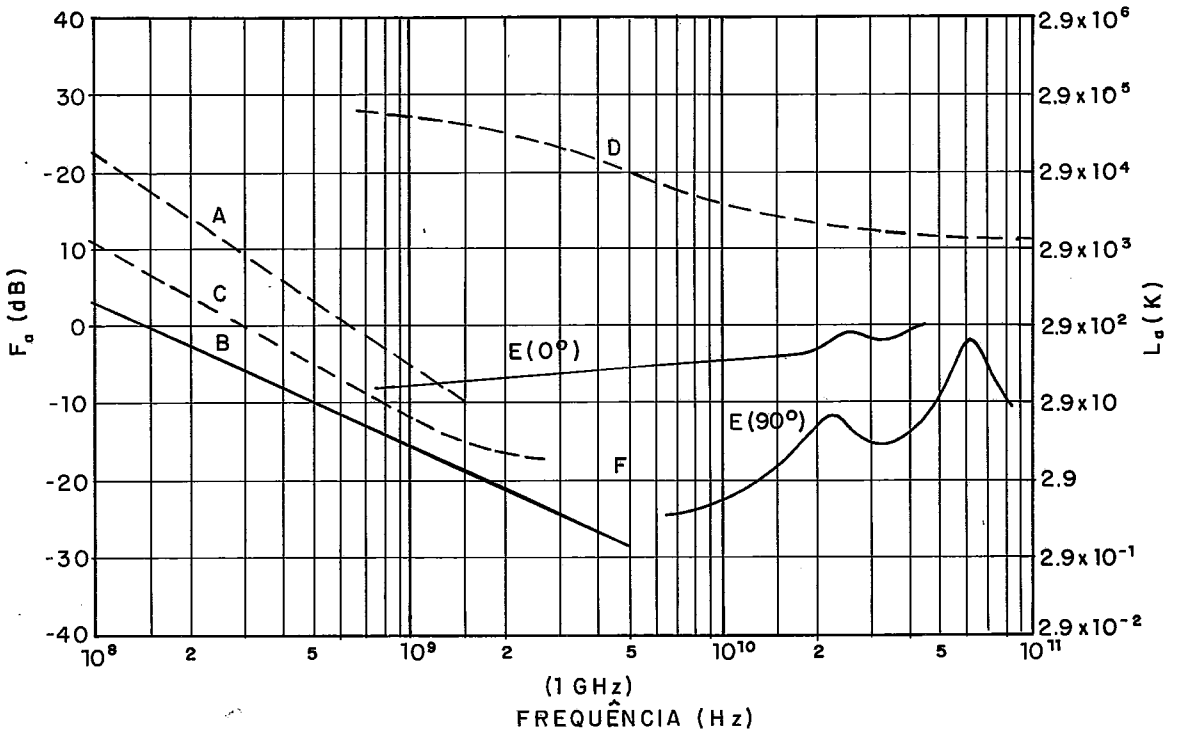
P_i potência das fontes interferentes (dBm)

A partir desta relação podemos notar que para valores de potência de sinal interferente superiores a $-7,5$ dBm (180 uW) aproximadamente na recepção das estações móveis, a potência equivalente resultante deverá se sobrepor à própria potência de ruído derivada da inigção automotiva, devendo a partir deste limite ser considerada a principal fonte de interferência no sistema. Em se considerando o ruído automotivo incidente nas estações base, este limite deve se situar em um valor de $-14,9$ dBm (< 100 uW).

Finalmente devemos considerar o efeito da interferência co-canal. Note-se entretanto que por se tratar de interferência causada por sinais atuantes na própria faixa de passagem do receptor, o limite de rejeição normalmente estabelecido para o combate a este tipo de interferência (representado pela fórmula II.2) é equivalente ao nível de ruído mínimo determinado dentro do ambiente considerado, isto é, qualquer sinal de potencial menor que este valor não pode ser diferenciado de um ruído e deve então ser desconsiderado. Desse modo, se aplicarmos uma relação logaritmica à fórmula II.2 chegamos naturalmente à fórmula II.3, relativa à potência de ruído externo mínima em decibéis, que em nosso caso é igual a:

$$P_n = F_a + 10 \log_{10} 132 \text{ KHz} - 204 \text{ (dBW)}$$

A figura IV.7, retirada de [23], fornece para as frequências de operação em torno de 150 MHz e em uma área com incidência de ruído artificial média, um valor para a figura de ruído F_n de aproximadamente 18 dBW.



- A: Ruído artificial estimado em área comercial mediana.
 B: Ruído galáctico.
 C: Ruído galáctico de faixa concentrada.
 D: Irradiação solar.
 E: Ruído atmosférico graças à oxigênio e vapor d'água.
 F: Corpos negros.

Figura IV.7 - F_n versus frequência na faixa de 10^8 a 10^{11} Hz
 ([23], Report 670, figura 3).

Dessa forma, chegamos a um limite de rejeição de :

$$P_n = 18 \text{ dBW} + 51,2 \text{ dBW} - 204 \text{ dBW}$$

$$P_n = -134,8 \text{ dBW}$$

ou

$$P_n = -104,8 \text{ dBm}$$

Tal valor é válido tanto para os receptores móveis como para os fixos.

Dessa forma, vemos que o nível máximo de interferência atuante no sistema é dado pelos ruídos provenientes de ignição automotiva, devendo ser considerado como referência para o estabelecimento do nível mínimo de sinal disponível para recepção. Devemos ainda considerar que deve ser mantida uma relação entre sinal e ruído mais distorção que permita a interpretação conveniente do sinal recebido, sendo que o valor requerido para esta relação, com vistas à manutenção da qualidade da conexão, deverá ser definido em função da avaliação quantitativa das atenuações cíclicas atuantes no sistema, ou seja, aquelas devidas a irregularidades no perfil do ambiente de propagação cujos efeitos são levantados de forma estatística. Tais atenuações podem ser resumidas basicamente pelas atenuações por sombras e por multicaminhos de propagação.

Devido ao seu caráter extremamente específico em função do perfil do terreno em que atua, a atenuação devida aos multicaminhos de propagação deve ser avaliada bastante superficialmente, pois uma quantização mais rigorosa envolveria um esforço bastante grande de levantamento experimental.

Quando da determinação do método de modulação apropriado ao sistema no item IV.3, foram obtidos os valores para a relação E/N necessários para a manutenção da taxa de erros a um nível apropriado. Através da relação IV.2, temos que para um sistema com taxa de transferência de 66 Kbps e

banda de passagem de 132 KHz, a relação sinal/ruído pode ser dada por:

$$S/N \text{ (dB)} = \frac{E}{N} \text{ (dB)} - 3 \text{ dB} \quad (\text{IV.8})$$

b 0

Se considerarmos o valor de 20 dB para a relação $\frac{E}{N}$ obtido da figura IV.1 para sinais ortogonais binários em um canal com atenuação por multicaminhos de propagação, o qual mantém a taxa de erros em 8×10^{-3} (BER), temos que a relação sinal/ruído deverá ser mantida a níveis próximos de 17 dB.

A atenuação por sombras também apresenta uma relação bastante forte com o perfil de aplicação considerado e com a localização das estações com relação às obstruções, mas seus efeitos podem ser avaliados de forma aproximada em função da altura da estrutura interposta através do ábaco da figura II.1. Assim, a atenuação devida à interposição de uma estrutura com altura estimada de 70m no caminho de propagação do sinal até uma estação móvel se deslocando próxima à mesma, seria da ordem de 8 dB para a freqüência considerada. Se arbitrarmos que acima deste limite de altura a obstrução deve ter seus efeitos avaliados de forma mais detalhada, podemos considerar tal valor de atenuação como uma estimativa de pior caso para a região.

DUFF [16] avalia os efeitos da interposição de estruturas pela subtração de um termo de correção para compensar as perdas devidas às irregularidades do terreno no caminho de propagação do sinal, cujo valor pode ser estipulado em relação à altura média das elevações através da figura IV.8. Para a banda alta de freqüências e uma altura média de elevações em torno de 70 m (230 pés, o pior caso

considerado anteriormente), temos um acréscimo de aproximadamente 8dB às atenuações no caminho de propagação, compatível com o valor encontrado no ábaco de BULLINGTON.

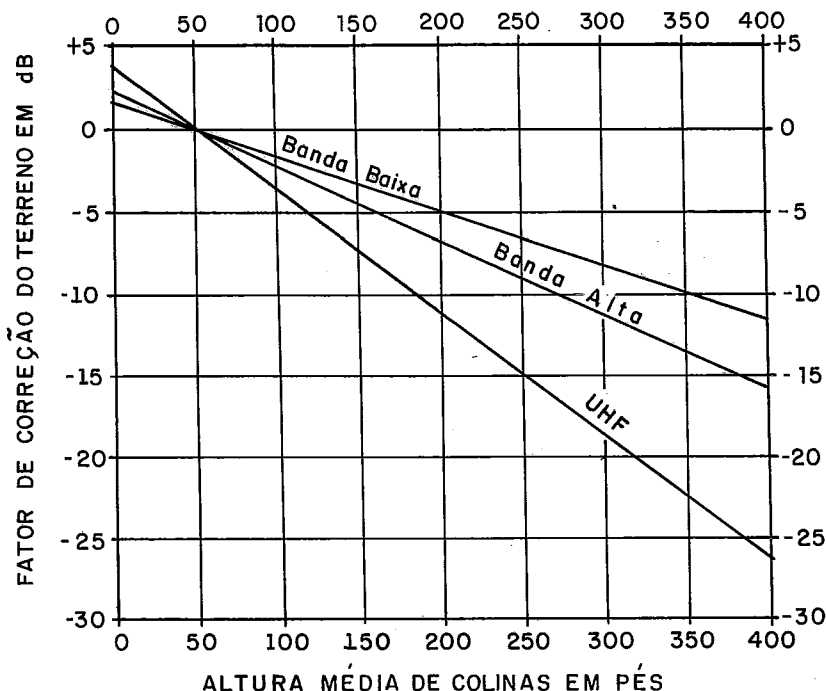


Figura IV.8 - Fator de correção por irregularidades do terreno (DUFF [16], figura 2.4).

DUFF [16] define em seu trabalho um parâmetro chamado margem de desempenho para um sistema de comunicação, dado pela relação:

$$M_d = P_d - P_{msu} \quad (IV.9)$$

onde:

M_d margem de desempenho (dB)

P_d potência disponível no receptor (dBm)

P_{msu} ... potência mínima utilizável no receptor (dBm)

Podemos então avaliar, de acordo com os resultados obtidos, que a margem de desempenho deverá observar os efeitos destas atenuações para que possam ser alcançados os níveis de probabilidade de comunicação requeridos pelo sistema. Note-se entretanto que, para uma estimativa total da atenuação média encontrada no caminho de propagação dos sinais dentro do ambiente de aplicação, deveremos optar pela utilização do modelo estatístico de Allsebrook e Parsons[14] apresentado no item II.2.2. Desse modo, considerando-se que esta margem incorporará somente os efeitos dos multicaminhos de propagação, posto que este modelo já envolve os efeitos da interposição de obstáculos no caminho de propagação de forma ponderada, seu valor deverá ser da ordem de 17 dB. Cabe observar que para o cálculo da potência mínima utilizável no receptor devemos permitir que a mesma supere a potência de sinal interferente de maior intensidade atuante no receptor, sendo que tal valor deve ainda prever que este ruído também é atingido pelo ganho da antena receptora. DUFF [16] sugere como valores típicos para este ganho níveis em torno de $G_{rm} = 0$ dB nas estações móveis e de $G_{rb} = 6$ dB nas estações base. Assim, considerando a interferência por ignição automotiva, pode-se obter a potência de sinal requerida para as estações móveis:

$$P_{dm} = P_m + M_d + G_{rm} = -66,6 \text{ dBm} + 17 \text{ dB} + 0 = \underline{-49,6 \text{ dBm}}$$

E para estações base:

$$P_{db} = P_b + M_d + G_{rb} = -88,6 \text{ dBm} + 17 \text{ dB} + 6 \text{ dB} = \underline{-65,6 \text{ dBm}}$$

Sempre lembrando que tais valores são representativos de situações de pior caso.

IV.9 - Comprimento dos enlaces

Caracterizados os canais de comunicação a serem utilizados nos enlaces entre as estações móveis e fixas, deve-se então determinar o alcance máximo para estes enlaces de forma a delimitar, dentro dos níveis de confiabilidade adotados, as áreas de atuação das estações móveis em relação a situação geográfica da região considerada para o seu deslocamento. Com a demarcação destas áreas de atuação podem então ser definidas as localizações de tantas estações base quantas forem necessárias á cobertura de toda a área englobada pelo sistema.

Para a determinação do comprimento dos enlaces de comunicação estabelecidos entre estações móveis e fixas, devemos inicialmente estabelecer alguns parâmetros para o sistema, como por exemplo a potência disponível para efetuar a transmissão nos dois tipos de estação. DUFF [16] apresenta como típicos para sistemas móveis de comunicação os valores de potência de transmissão dentro das faixas de 10 a 100 watts para as estações móveis e de 30 a 300 watts para as estações fixas. Na notificação 742-2 das recomendações do CCIR [24] são apresentadas as características de alguns sistemas de telefonia móvel pública instalados ou em fase de planejamento em diversos países, sendo que as potências associadas ás estações nestes sistemas se situam em uma faixa de até 100 W (50 dBm) para as estações base e 15 W (42 dBm) para as estações móveis, valores que tomaremos como base em

nosso trabalho. A aplicação destes valores dentro dos modelos de atenuação apresentados no decorrer do trabalho devem então permitir a superação dos níveis mínimos de sinal estabelecidos para a correta interpretação das mensagens no ponto de destino, seja ele fixo ou móvel.

Podemos ainda fixar a altura de uma antena em uma estação base padrão, onde o fator preponderante na definição de suas dimensões é o custo, em aproximadamente 50 m, sendo que sua construção em uma elevação permite um acréscimo em sua altura efetiva que pode ser da ordem da altura da elevação se a mesma permitir visada sem obstruções até as proximidades do ponto de recepção.

Para uma estimativa total da atenuação média encontrada no caminho de propagação dos sinais dentro do ambiente de aplicação, a utilização do modelo estatístico apresentado no item II.2.2 é bastante atraente no sentido de, considerando uma distribuição típica de atenuações para diferentes tipos de ambiente de aplicação, permitir a obtenção de um modelo homogêneo de perdas.

Para estimar o limite para as distâncias cobertas pelas estações dentro do sistema, podemos utilizar a seguinte fórmula:

$$P_d = P_t + G_t - L_t + G_r \quad (IV.10)$$

onde:

P_d potência disponível no receptor (dBm)

P_t potência de transmissão (dBm)

G_t ganho da antena transmissora (dB)

G_r ganho da antena receptora (dB)

L_t perdas por propagação (dB)

Note-se que tal formulação negligencia as perdas no cabo condutor entre equipamento e antenas, devendo estas serem mantidas a níveis mínimos. Podemos ainda considerar os ganhos típicos utilizados por DUFF [16] para as antenas das estações móveis ($G_{tm} = 3$ dB e $G_{rm} = 0$ dB) e para as estações base ($G_{tb} = 3$ dB e $G_{rb} = 6$ dB) . Assim, as perdas por propagação para o enlace móvel-base devem se situar em torno de:

$$L_{tmb} = P_{tm} + G_{tm} + G_{rb} - P_{db} = 42\text{dBm} + 3\text{dB} + 6\text{dB} - (-65,6\text{dBm})$$

$$L_{tmb} = 116,6 \text{ dB}$$

E para o enlace no sentido base-móvel:

$$L_{tmb} = P_{tb} + G_{tb} + G_{rm} - P_{dm} = 50 \text{ dBm} + 3 \text{ dB} - (-49,6 \text{ dBm})$$

$$L_{tmb} = 102,6 \text{ dB}$$

Como o sentido de conexão que permite menores distâncias para os enlaces é o sentido base-móvel, procuraremos equiparar as características de propagação através da colocação dos níveis de atenuação permitidos para os dois sentidos nos mesmos valores, o que implica na simplificação dos equipamentos pela eliminação do ganho de transmissão na

estação móvel e do ganho de recepção na estação base, além de permitir a diminuição da potência disponível para transmissão nas estações móveis para 37 dBm ou 5 watts.

Aplicando o modelo de Allsebrook e Parsons [14] para estes valores de perda total e utilizando como típicos de um ambiente suburbano valores para a altura média dos edifícios circundantes (h_o) de 30 metros e para a largura média das ruas (d_r) de 20 metros temos que em II.10:

$$L_e = 20 \log_{10} \frac{30 - 3}{548 \times (20 \times 10^{-3} \times 150)^{1/2}} + 16 \text{ (dB)}$$

$$L_e = -15 \text{ dB}$$

Calculando os valores teóricos de atenuação de espaço livre e de terra plana através de II.6 e II.8 temos que:

$$L_l = 76 + 20 \log_{10} d \text{ (dB)}$$

$$L_p = 75 + 40 \log_{10} d \text{ (dB)}$$

Se considerarmos o valor para as perdas por difração nas irregularidades do terreno como sendo de 8 dB, que é o valor obtido anteriormente através da figura IV.9, temos que, para a atenuação permitida para os enlaces em II.9:

$$102,6 = 61 + 20 \log_{10} d + ((20 \log_{10} d - 1)^2 + 64)^{1/2} \text{ (dB)}$$

$$d \approx 10,5 \text{ Km}$$

Conclue-se então que, para ambientes de aplicação tipicamente suburbanos permeados por elevações de terreno com alturas de até 70 metros e de edificios com altura média de 30 metros, deverá ser adotada, para os parâmetros considerados, uma distância máxima de cobertura para os enlaces de aproximadamente 10.5 Km.

O perfil topográfico considerado para os cálculos anteriores se adapta a grande parte da área a ser coberta pelo sistema dentro do município. Entretanto, tal alcance deve ser mais limitado se considerarmos áreas com grandes estruturas edificadas, como o centro da cidade e seus bairros mais urbanizados. Nestas regiões, a mudança paramétrica mais sensível é a altura média das edificações, podendo ser mantidos com boa aproximação os valores adotados anteriormente para a distribuição das irregularidades do relevo (isto é, esperando uma certa homogeneidade topográfica, salvo algumas excessões) e para o limite de ruído incidente. Dessa forma, se adotarmos uma média para a altura de edificios da ordem de 60 metros, teremos que o novo fator de atenuação ficará em torno de $L_e = -8,4$ dB. Tal valor implica na adoção de novas distâncias de cobertura para os enlaces em ambientes urbanos da ordem de $d \cong 7$ Km.

Não devemos esquecer porém que existe a situação oposta em determinadas regiões do município, onde as características de ocupação se aproximam bastante das encontradas em zonas rurais, com áreas onde a altura média das construções não ultrapassa os 10 metros. Dentro destas regiões os níveis de ruído incidente tendem a ser consideravelmente menores, podendo ser estimado um pior caso para a concentração de

tráfego de veículos em torno de 30 carros por minuto, o que fornece um nível de ruído para uma estação móvel típica de aproximadamente $-75,4$ dBm. Com estes valores e adotando o novo valor para a atenuação devida às edificações de $L_e = -26,6$ dB, temos que a distância máxima de cobertura para um enlace em ambientes tipicamente rurais será da ordem de $d \approx 35$ Km.

De posse destes valores podemos partir para a delimitação da cobertura realizada pelas estações base dentro da região considerada. Note-se que é interessante a adoção de dimensões para a área coberta pelas estações base que se relacionem com as condições de propagação de sinal encontradas dentro da mesma, o que sugere a adoção de limites de cobertura variáveis dentro dos diversos ambientes encontrados nesta região.

IV.10 - Localização das estações

Caracterizada a conexão a ser estabelecida entre estações fixas e móveis dentro do sistema, o próximo passo deverá constar então da distribuição, pela área coberta, de tantas estações base quantas sejam necessárias para a prestação dos serviços propostos. Podemos notar que surgem dois grandes problemas na atribuição dos canais de comunicação para a realização destas conexões: o conjunto limitado de frequências disponíveis para a comunicação (graças ao congestionamento do espectro) e as limitações de alcance impostas pela qualidade exigida para as conexões. Uma opção bastante utilizada atualmente para se contornar tais problemas é a adoção dos chamados sistemas celulares. Torna-

se então necessária uma apresentação deste tipo de sistema, com o objetivo de definir sua forma de aplicação dentro das particularidades do projeto considerado.

IV.10.1 - Sistemas celulares

O conceito celular determina que uma região a ser coberta por um sistema de estações móveis seja dividida em áreas, chamadas células, que possuem suas próprias estações base. Tais estações transmitem os sinais de comunicação numa potência que seja suficiente para que toda a célula seja coberta, mas que interfira o mínimo possível na comunicação dentro da célula adjacente. Cada célula se utiliza de determinado grupo de frequências para a comunicação com unidades móveis localizadas nas mesmas, sendo que o baixo nível de potência do sinal utilizado possibilita a redução da interferência entre os canais. Se duas células estão situadas a distâncias tais que não haja interferência efetiva entre as unidades circulantes nas mesmas, a comunicação pode ser realizada em canais de comunicação idênticos dentro das duas áreas (reutilização de frequências). Assim, a faixa total de frequências utilizada no sistema independe do número de usuários na região coberta, sendo a mesma distribuída por células, adjacentes ou não, que permitam a separação geográfica necessária à redução ou mesmo eliminação da interferência. Um modelo de distribuição de frequências entre células de um sistema com 3 grupos distintos de canais é apresentado na figura IV.9.

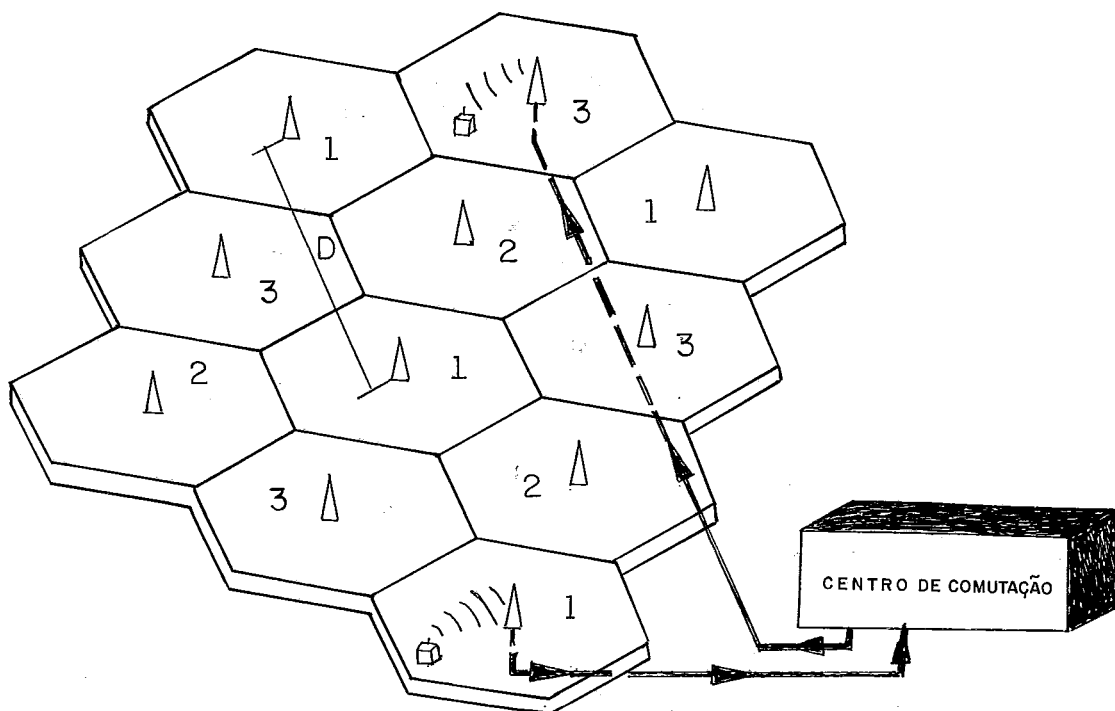


Figura IV.9 - Sistema celular de comunicação com três grupos de canais.

A medida que se deslocam, as unidades móveis vão saindo da área coberta por uma célula e entrando em área coberta por outra, onde a comunicação com a estação base é feita em canais de frequências diferentes. Surge então a necessidade de se manter uma estação central que possua informações acerca da localização das unidades dentro do sistema, coletando periodicamente notificações sobre o nível de sinal recebido pelas estações base. Para isso, tal estação deve ser conectada a todas estações base através de enlaces fixos (por rádio ou meio condutor) e de acordo com as informações adquiridas, direcionar chamadas às células corretas ou comutar uma conexão em curso entre uma unidade móvel e uma estação base para outra que porventura ofereça um serviço mais confiável. Os efeitos desta comutação na comunicação

devem ser mantidos a níveis mínimos, tanto pela limitação do número de ocorrências como pela minimização de seu tempo de duração. GLANCE [17] realizou um estudo da taxa de erros causada por tais comutações em um sistema de transmissão digital utilizando modulação PSK, levantando resultados relativos ao incremento de taxa de erros normalmente encontrada (devido a atenuação de interferências). Algumas das conclusões apresentadas sugerem a utilização de taxas de sinalização de maior valor possível para os canais, a adoção de valores limite do nível de sinal para a realização da comutação e a minimização do tempo entre modificações do nível de sinal. É evidenciada também a maior eficiência de métodos de modulação diferencial por fase (DPSK) pela maior capacidade de recuperação dos dados (independência do valor absoluto da fase da portadora). Deve também ser prevista, graças a estas comutações, a ocorrência de erros de deslocamento, pois regiões de uma célula onde a relação sinal/ruído apresente valores muito baixos (pontos mortos) podem ser preenchidos por um sinal mais forte proveniente de outra estação base em célula adjacente, possibilitando a interpretação de uma falsa situação de mudança de célula. Tais erros podem ser minimizados pela adoção de um limite de tempo para a decisão de comutação, que deve ser superior à média dos tempos de duração das lacunas incidentes na região, mas que é bastante dependente do trajeto e da velocidade de deslocamento dos usuários.

Uma das grandes vantagens de um sistema que adote o conceito celular é a facilidade de adaptação. Quando da saturação dos canais disponíveis nas células, devida ao

crescimento do número de usuários, as mesmas podem ser subdivididas em segmentos menores que adotem a mesma filosofia de comunicação (divisão celular), isto é, dividindo entre si os canais de comunicação disponíveis pelo técnica de reutilização de freqüências. Desse modo, o mesmo grupo de canais pode servir a um maior número de usuários, considerando-se no entanto certas limitações decorrentes da interferência entre os mesmos. Outra aplicação da divisão celular é a seleção geográfica dos tamanhos de células, onde um arranjo pode se utilizar de células menores somente onde haja uma alta densidade de tráfego (centros urbanos), mantendo maiores raios de cobertura para regiões mais isoladas [5].

IV.10.2 - Definição do sistema celular

Na implantação de um sistema baseado no conceito celular devem ser considerados vários fatores, sendo o principal deles a área de cobertura necessária a cada célula. Tal fator depende basicamente das condições de propagação e de interferência encontradas nos caminhos a serem percorridos pelos sinais, sendo que seus limites para esta aplicação foram determinados no item IV.9.

De acordo com os valores estabelecidos para o alcance das conexões, densidade de usuários da área a ser servida e faixa de freqüências utilizada, pode ser dimensionado o tamanho das diferentes células que formam o sistema. Entretanto, deve ser considerada também sua efetividade em relação às necessidades do usuário, pois da mesma maneira que células muito pequenas podem ocasionar um grande número

de comutações entre estações num percurso médio , com conseqüente degradação dos serviços , a situação reversa (células grandes) pode se tornar super dimensionada em razão dos pequenos deslocamentos realizados em média e por concentrar um número maior de canais em áreas de alta densidade de usuários.

Temos ainda que, na realidade, o formato das células não atende ao formato hexagonal utilizado na definição teórica de tais sistemas. Atualmente são obtidos os contornos reais aproximados das células em um sistema através da aplicação de modelos bastante refinados de propagação, com o auxílio de ferramentas computadorizadas. Note-se que tais modelos são essencialmente estatísticos, pois mesmo duas estações percorrendo o mesmo caminho em tempos diferentes estarão sujeitas a níveis de sinal similares mas com distribuições distintas. Esse amorfismo das células acaba causando dificuldades na definição dos contornos de cobertura e na expansibilidade do sistema, pois a adaptação ao crescimento do tráfego torna-se alvo de grande dose de improviso, levando a um aproveitamento ineficiente de espectro e de equipamento.

Outro fator cuja determinação é de importância fundamental para o bom desempenho é a distância mínima entre células atuando com conjunto de frequências iguais. Tal distância é em geral definida assumindo-se que a relação sinal/interferência não caia abaixo de determinado valor por mais que 1% do tempo em toda a área da célula. HUGHES et alia [21] sugerem que seja considerada para isso uma margem de assimilação da atenuação por multicaminhos de 7 dB, valor que é plenamente satisfeito com os 17 dB considerados neste

projeto.

A taxa de reutilização de freqüências em um sistema pode ser descrita por [24]:

$$(D/R) = (3n)^{1/2} \quad (\text{IV.11})$$

onde:

D ... distância entre os centros das células (assumindo-os como localização da estação base transmissora)

R ... raio das células (mesma unidade de D)

n ... número de grupos de canal divididos entre as células

Em geral, baseando-se num formato hexagonal para as células, somente certos valores de n são possíveis (3, 4, 7, 9, 12, 13, etc.).

Para a definição do raio das células podemos estabelecer em primeiro lugar os valores para aquelas que devam ter os menores raios, ou seja, aquelas localizadas em regiões de maior incidência de ruídos artificiais, notoriamente as regiões mais urbanizadas. Pelos cálculos de distância máxima para os enlaces realizados anteriormente, estas regiões devem suportar deslocamentos de até 7 Km mantendo a relação sinal/ruído nos níveis requeridos. Podemos admitir que tal distância permita uma ocupação celular bastante razoável, pois sua área de cobertura não deve sobrecarregar o número de comutações inter-celulares dentro da extensão da área a ser servida pelo sistema. Pode-se considerar ainda que a densidade de usuários no mesmo é pequena, não devendo causar para este limite um excesso no número de usuários servido por um canal

(ou grupo de canais). Consideraremos porém uma margem de deslocamento para as estações móveis que permita que a comutação de canais, quando da passagem entre células, seja feita de forma suave, o que permite que a decisão de comutação possa ser realizada com a estação já se deslocando dentro da nova célula. Esta margem, que deve permitir, á uma velocidade média de deslocamento, um tempo de percurso fora da célula maior que o tempo médio de duração das lacunas de comunicação, pode ser arbitrada para esta aplicação em aproximadamente 1 Km , o que nos dá uma cobertura celular de 6 Km para regiões urbanas e prevê uma relação sinal/ruído média no perímetro da célula de aproximadamente 20 dB, se considerarmos a diferença obtida pela aplicação da fórmula de propagação de Allsebrook e Parsons. Dessa forma, se durante o percurso uma estação base interpretar um nível de sinal de uma estação móvel a ela relacionada que não seja superior a 20 dB do nível máximo de ruído esperado, durante um tempo maior que o tempo estimado de duração de uma lacuna no perfil de propagação, tal fato é informado ao centro de comutação, o qual ordena às estações base vizinhas que realizem medições acerca da qualidade de sinal para esta estação no canal considerado. De posse destas informações, o centro de comutação então avalia se há melhor incidência para o sinal em uma destas estações e realiza a comutação caso se mostre possível.

Com o valor mínimo da relação sinal/interferência estabelecido para o perímetro da célula, podemos calcular a distância mínima para a reutilização de frequências por outra estação base. Se considerarmos que uma estação móvel se

deslocando no perimetro desta outra célula gera um sinal de 37 dBm, o qual deve ser atenuado durante a propagação e chegar à uma estação também se deslocando pelo perimetro da célula inicial com níveis inferiores ao nível máximo de ruído devido à ignição automotiva nesta estação, teremos que tal atenuação deverá ser da ordem de $(37 - (-49,6))$ dBm = 86,6 dBm, já contando com ganho zero de transmissão para as estações móveis. Aplicando-se este valor na fórmula II.9 para o perfil de terreno correspondente aos centros urbanos, temos que:

$$86,6 = 67,6 + 20 \log_{10} d + ((20 \log_{10} d - 1)^2 + 64)^{1/2} \quad (\text{dB})$$

$$d = 2,6 \text{ Km}$$

Se aplicarmos o limite inferior de 3 para o número de grupos de canais utilizados na fórmula IV.11, temos que $D/R = 3$, o que assume que, para este padrão, a distância entre duas estações móveis se deslocando no perimetro das células consideradas deva ser de, no mínimo, um raio de célula, que para o tamanho de célula utilizado é de 6 Km. Tal limite obedece então com folgas à distância mínima calculada, possibilitando a adoção de três grupos distintos de canais para a cobertura do sistema. Note-se que mesmo com a utilização da fórmula para o cálculo da distância proposta pelo CCIR [24], que simplifica a relação de atenuação para uma raiz enésima da distância, e considerando o valor de 4 proposto para 'n' por CALHOUN [5], temos que $(D/R) = (C/I)^{1/4}$, que para um valor adotado de 20 dB para a relação sinal/interferência mínima no perimetro da célula fornece para D/R o valor de 3,16, que é praticamente igual ao adotado.

Podemos então direcionar os cálculos descritos acima para a determinação de limites que considerem os comprimentos mais extensos de enlace, em regiões onde o perfil de propagação apresenta menor incidência de ruídos e de interposição de edificações. Dessa forma, em se mantendo a relação sinal/interferência mínima no perímetro da célula em 20 dB, nas áreas consideradas suburbanas, para as quais o limite de distância para as conexões foi calculado em aproximadamente 10,5 Km, teremos um novo raio de célula de aproximadamente 8,8 Km. Já para as áreas cujo perfil se assemelha bastante ao encontrado nos ambientes rurais, o comprimento máximo de enlace original de 35 Km deve ser reposicionado para uma distância em torno de 30 Km, deslocando para este valor o raio da célula.

A faixa de frequências de 1,6225 MHz considerada para o projeto permite que sejam utilizados 7 canais de 132 KHz, com espaçamento de 99 KHz entre eles, para a troca de informações. Este número de canais permite então a existência de dois grupos de dois canais e um grupo de três canais a serem distribuídos por entre as células do sistema, através do conceito de reutilização de frequências destacado anteriormente. É interessante relembrar também que as frequências mais baixas apresentam-se melhor em relação ao contorno de obstáculos, devendo então serem utilizadas nas células que envolvam maior concentração de estruturas. Deve-se pressupor então que sejam utilizados para a implementação dos canais de ocupação frequências pertencentes a outras faixas que não esta.

Com as dimensões das células componentes do sistema calculadas e delineada a distribuição de canais dentro da topologia celular, podemos então estabelecer os métodos de atribuição de canais e de controle no estabelecimento e manutenção dos canais de comunicação a serem utilizados.

IV.10.3 - Atribuição dos canais e controle das conexões

A atribuição dos canais a serem utilizados dentro de uma célula pode ser feita de três maneiras principais, de acordo com GUPTA [18]:

- . Atribuição fixa , onde cada célula possui um subconjunto determinado de canais. Se os canais passíveis de utilização estiverem saturados, as chamadas destinadas à célula correspondente são bloqueadas.
- . Atribuição dinâmica , onde a estação central controla um conjunto de canais livres, gerenciando a atribuição destes canais às células de acordo com suas necessidades e obedecendo à disposição de canais de mesma frequência em células separadas pela distância mínima. Em tais esquemas tornam-se necessários recursos nas estações centrais que sejam capazes de processar rapidamente, e com algoritmos otimizados , o grande número de dados provenientes das estações base, solucionando eventuais impasses através da atribuição de pesos ou de forma randômica.

- . Atribuição híbrida, onde o número de canais é dividido em dois grupos: um seguindo a atribuição fixa, para garantir uma probabilidade mínima de acesso em cada célula; e outro de acordo com a atribuição dinâmica, possibilitando ao sistema servir às descontinuidades do nível de serviço nas diferentes células nos diferentes horários. tal divisão de atribuições segue uma percentagem baseada em estudos estatísticos de acordo com a distribuição geográficas dos usuários, podendo serem usadas para isso técnicas de simulação.

Analisando estes diferentes processos podemos deduzir um melhor aproveitamento de recursos pelo modelo híbrido. Porém, o número de usuários reduzido do sistema considerado permite a utilização de um modelo de atribuição fixa dos canais sem degradação no atendimento, possibilitando pela sua simplicidade a eliminação do custo e do atraso de processamento envolvidos no processo decisório inerente aos outros modelos.

Para a manutenção das conexões entre estações, os sistemas celulares se utilizam de centros que efetuam a comutação dos canais de comunicação, à medida que a unidade móvel se desloca pelas diferentes células, além de monitorar os canais estabelecidos para garantir um controle confiável da comunicação. Tais centros necessitam de informações que possibilitem a localização rápida de um veículo para eventuais conexões. Este rastreamento dentro da região coberta pelo sistema pode ser feito de diferentes maneiras, entre elas:

- . Cada unidade móvel transmite seu número de identificação a intervalos regulares (automaticamente). Este número é recebido pela estação base que cobre a região onde se encontra a unidade, sendo que a base por sua vez retransmite esta informação adicionada à sua própria identificação para a estação central, que atualiza suas tabelas de localização. Para evitar conflitos (duas bases recebendo a mesma identificação), pode ser adicionada a esta informação uma representação numérica da intensidade de campo recebida, escolhendo a estação central a base que recebeu o sinal mais forte. A maior desvantagem deste método é a carga de utilização de canal introduzida para a emissão destas mensagens de controle, muito embora seus valores absolutos sejam mínimos em vista do tamanho reduzido destas mensagens.
- . Quando da necessidade de conexão, a estação central circula entre as bases um sinal de chamada que é então retransmitido por estas. O veículo visado reconhece esta chamada e transmite um reconhecimento para a (ou as) estação base que originou a chamada, que por sua vez informa a estação central. Tal processo também deve envolver a transmissão da representação do nível de sinal recebido pelas estações base para que a estação central decida, se necessário, sobre qual a mais apropriada para a conexão.

Devemos notar que para esta aplicação o uso otimizado do canal de comunicação é mais importante que o tempo perdido na

localização da estação móvel quando do estabelecimento da conexão, pois os atrasos de pesquisa inseridos pelo não conhecimento prévio da localização de uma estação móvel devem se situar a níveis controlados, tanto pelo número reduzido de estações base como pela taxa de transferência disponível nos canais de comunicação. Optaremos então pela utilização do método de rastreamento por demanda, que além disso simplifica os procedimentos e os recursos envolvidos na manutenção e no manuseio de uma tabela de localização.

IV.10.4 - Distribuição geográfica

Como último procedimento dentro da metodologia de projeto adotada, devemos definir a localização geográfica das estações base necessárias para a cobertura da região considerada. Para isso adotaremos a estratégia de definir inicialmente o ponto de irradiação para as células que devam cobrir as áreas de maior densidade de ocupação, lembrando que estes pontos são compostos por estações que se utilizam de antenas omnidirecionais localizadas no centro das células.

Seguindo então esta estratégia, podemos definir a situação de uma célula que cubra, em primeiro plano, o centro da cidade e adjacências. Para a localização da estação base devem entretanto ser considerados alguns fatores, como a facilidade de acesso e as características de irradiação que o local oferece para a área coberta. Pela sua situação privilegiada e pela sua altura (aproximadamente 600 metros de altitude), que permitem uma cobertura excepcional de áreas contidas tanto na zona central como nas zonas sul e norte da cidade, podemos considerar como ponto de partida para o

sistema a instalação de uma estação base no morro do Sumaré, que além disso já é um ponto bastante explorado para a instalação de estações de rádio difusão, tendo por isso seu acesso bastante facilitado. Note-se entretanto que sua altura permite a diminuição das perdas atuantes no caminho de propagação, principalmente as devidas à propagação de terra plana, podendo então a nova equação para estas perdas ser dada por:

$$L_p = 53,6 + 40 \log d \quad (\text{dB})$$

10

Note-se entretanto que a cobertura proporcionada por uma célula deve ser otimizada também em relação ao aproveitamento dos espaços, eliminando a necessidade de implantação de novas células em áreas de tamanho reduzido. Desta forma, para que os pontos litorâneos desta área sejam totalmente atingidos, podemos assumir um raio de cobertura da ordem de 8 Km. Chegamos então, mantendo-se os níveis de atenuação devida à sombras e aos multicaminhos nas regiões centrais, e ainda a margem de desempenho estabelecida, a um novo valor para as perdas totais de:

$$L_t = 67,6 + 20 \log_{10} 8 + \left(\left(20 \log_{10} 8 - 22,4 \right)^2 + 64 \right)^{1/2} \quad (\text{dB})$$

$$L_t \approx 94,8 \text{ dB}$$

Com a manutenção da relação sinal/ruído no perímetro de uma célula em 20 dB, este nível de atenuação permite então a associação de valores para a potência de transmissão disponível na estação base em torno de 45 dBm ou 32 watts, que ainda mantêm a cobertura necessária à região. Note-se que a diminuição da potência de transmissão e, conseqüentemente, do alcance das conexões, permite ainda que se reduza o número

de usuários dos canais desta célula, o que implica em melhores condições para a transferência de informações nos mesmos pela redução do tráfego de mensagens em uma região de alta densidade demográfica.

Para a expansão da área coberta em direção às regiões suburbanas, é interessante a determinação dos pontos de instalação para as estações base considerando-se o melhor aproveitamento para a cobertura das áreas limitrofes do município, o que sugere como segundo passo, segundo este critério, a criação de uma célula que atenda ao seu extremo norte. De acordo com os limites operacionais da estação Sumaré e o perfil litorâneo da região, uma opção razoável seria a instalação da segunda estação base na Ilha do Governador. Se atribuirmos para esta região os parâmetros de cobertura pertinentes a áreas com perfil suburbano, o raio de cobertura, para uma antena situada a uma altura de 50 metros e com potência de transmissão associada de 50 watts como previsto, será da ordem de 10.5 Km. Como a arquitetura celular adotada prevê uma relação sinal/ruído no perímetro das células da ordem de 20 dB, uma solução para a manutenção deste raio de cobertura é a instalação da antena em uma elevação que permita um decréscimo de 3 dB no efeito total da propagação de plano terra para o modelo adotado, devendo então este acréscimo na altura efetiva da antena corresponder a um valor aproximado de 25 metros. Para a definição do ponto de irradiação nesta área podemos ainda considerar a possibilidade de extensão da cobertura até a Ilha de Paquetá, distante cerca de 5 Km do extremo norte da Ilha do Governador, além de tentar minimizar a penetração dos sinais

gerados por esta estação base em áreas pertencentes à célula definida anteriormente. Dessa forma, podemos optar pela instalação da estação nas proximidades do morro do Dendê, numa solução que procura preencher da melhor forma os espaços nesta região.

Uma terceira célula adjacente às duas estabelecidas anteriormente deve preencher o espaço correspondente aos bairros marginais à Avenida Brasil, num trecho delimitado pelo fim da área coberta pela estação Ilha do Governador, a partir de Brás de Pina. Adotando-se ainda para esta região os parâmetros de propagação de áreas suburbanas, pode-se estabelecer como melhor disposição para cobertura a localização de uma terceira estação base em um ponto próximo à Estrada do Portela, em Turiaçu (nas imediações de Honório Gurgel), cuja cobertura se estende então até as proximidades de Realengo pela Avenida Brasil e ainda alcança os 10 Km iniciais da Rodovia Presidente Dutra. Note-se que a potência de transmissão utilizada adotada nestas últimas duas células foi a estabelecida como disponível para transmissão nas estações fixas, e que a disposição destas estações considera sempre a facilidade de acesso às mesmas, com sua instalação em locais próximos a entroncamentos rodoviários.

A próxima etapa deve definir a cobertura da área que compreende a Barra da Tijuca, a partir de São Conrado. Para esta área as opções de instalação disponíveis são limitadas, pois suas dimensões são reduzidas devido à proximidade dos limites de contorno das células do Sumaré e de Turiaçu. É interessante então a instalação da quarta estação base nas proximidades do litoral, onde uma boa opção pode considerar

as imediações do Condomínio Alfabarra, na Barra da Tijuca, e prever um raio de cobertura também da ordem de 10.5 Km, que permite atingir os limites ao sul da célula do Sumaré e da célula de Turiaçu, extendendo ainda os contornos do sistema até as proximidades do Recreio dos Bandeirantes. Para se evitar que grande parte da potência irradiada por uma antena omnidirecional na estação considerada seja perdida pela difusão por sobre o Oceano Atlântico, podemos assumir a utilização de uma antena direcional, projetada para suprir o semicírculo correspondente à área considerada, e que deve então permitir a utilização de um valor consideravelmente menor para a potência necessária à irradiação numa estação que permita tal raio de cobertura (75 m de altitude).

Para a região restante do município, podemos considerar que seu perfil de ocupação permita a propagação dos sinais gerados por uma estação fixa sem intervenção significativa de interferências artificiais e sem a interposição de elevações de terreno que inviabilizem a cobertura de suas áreas povoadas, o que sugere a criação de uma célula cujos limites de cobertura se situem em um máximo de 35 Km. Estabelecido este limite, temos que a instalação de uma única estação base no centro desta área deve permitir a prestação dos serviços por toda sua extensão, o que sugere a localização desta última estação nas adjacências da Estrada do Magarce, que liga Campo Grande à Baixada de Sepetiba. A potência de transmissão necessária à cobertura do círculo de 20 Km de raio definido por esta região deve ser suficiente para a compensação de perdas da ordem de:

$$L_t = 49,4 + 20 \log_{10} 20 + \left(\left(20 \log_{10} 20 - 1 \right)^2 + 64 \right)^{1/2} \quad (\text{dB})$$

$$L_t \approx 101,7 \text{ dB}$$

Podemos então estimar a potência necessária para transmissão na estação base em um valor em torno de:

$$P_{tb} = L_t - G_{tb} + P_{dm} = 101,7 - 3 - 55,4 \quad (\text{dBm})$$

$$P_{tb} \approx 43,3 \text{ dBm ou } 20 \text{ watts}$$

Com a definição das características de cobertura da última célula necessária à implantação de um sistema atuante em toda a área do município, podemos então apresentar o aspecto geral da organização dos limites de cobertura na região através do mapa na figura IV.10.

Devemos ainda considerar que, em situações de atendimento emergencial pelas viaturas componentes do sistema, devem ser evitadas as situações de impossibilidade de comunicação, o que sugere a adoção de fontes transmissoras especialmente projetadas para a irradiação de sinal em túneis, que criam microcélulas de contornos bem definidos pela operação em um canal de frequência que pode tanto pertencer a uma das células adjacentes àquela em que se localiza o túnel como também a uma faixa superior de frequências que permita que o túnel atue como um guia de ondas para a propagação do sinal. Note-se que, dependendo da dimensão do túnel considerado pode ser necessária a utilização de mais de uma célula para a cobertura interna. Estes aspectos entretanto devem ser restritos à projetos que se atenham a um nível maior de detalhamento, não devendo no momento requerer maior atenção.

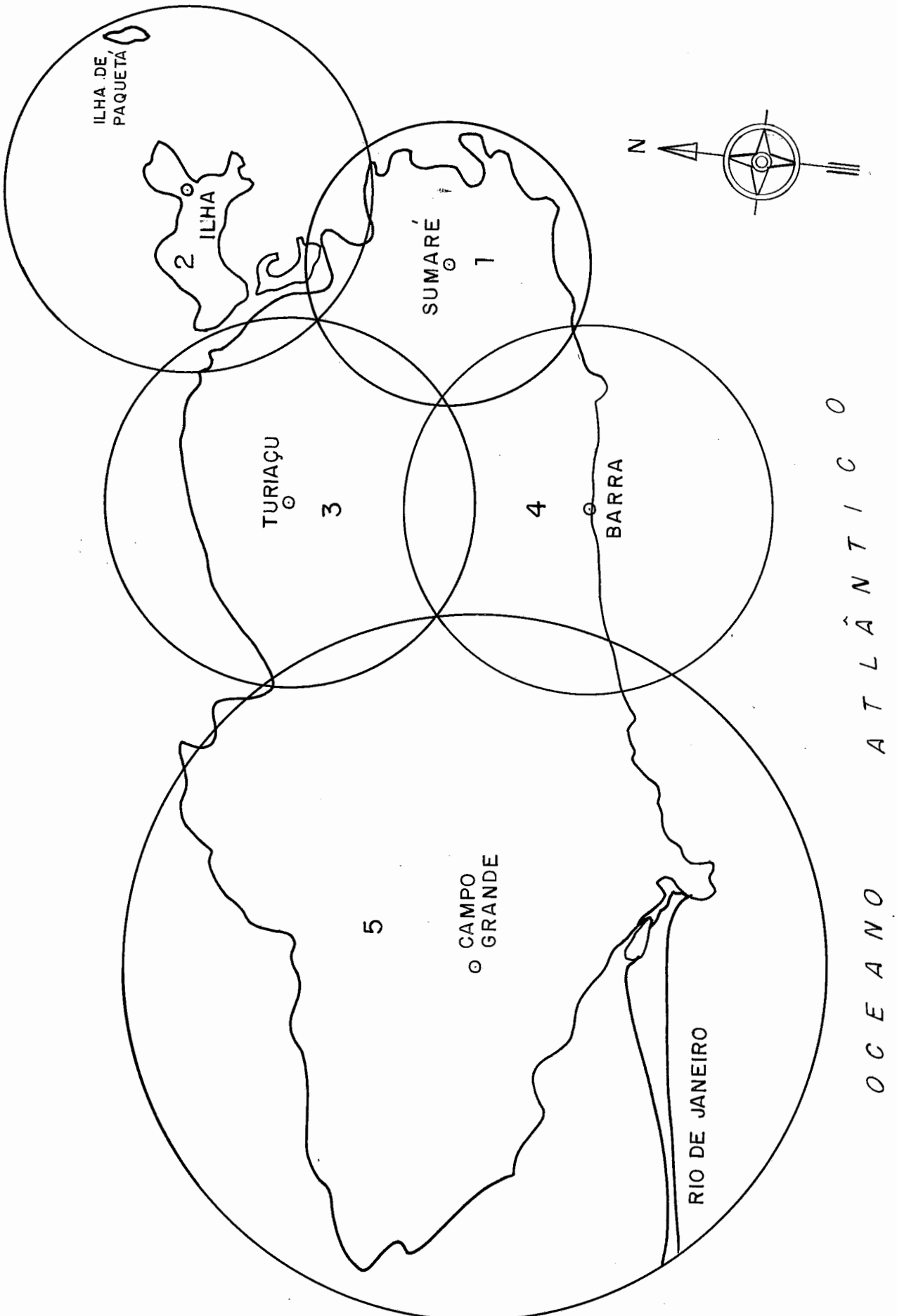


Figura IV.10 - Distribuição das células pelo município
(escala 1 : 307700).

Podemos então nos preocupar com o passo final da definição do sistema, que é a distribuição dos canais de comunicação de diferentes frequências por entre as cinco células fundamentais utilizadas na cobertura da região do município. Se considerarmos que a célula número 1 (Sumaré) é a que apresenta maior densidade de usuários, podemos lhe atribuir três canais de comunicação, o que pressupõe dessa forma a utilização de toda a faixa de frequências considerada na transferência de informações, devendo ser então alocado um outro grupo de frequências em outra faixa reservada para estes serviços na implementação dos canais auxiliares de controle pelas estações base, devendo ser sua definição uma tarefa mais simples pelo menor número de limitações que lhe são impostas para a correta interpretação do estado do canal. Se identificarmos os canais disponíveis para a comunicação em escala crescente de frequência como numerados de 1 à 7, podemos atribuir, para minimizar os efeitos da interferência entre canais adjacentes, os canais de números 1, 4 e 7 para atuação na primeira célula . Para a célula 2 (Ilha do Governador) podemos então dispor dos canais 2 e 5, restando para a célula 3 (Turiaçu), que possui fronteiras com as duas primeiras células, os canais de números 3 e 6. Tal divisão permite que os canais componentes de cada uma destas células se situe a uma distância de 561 KHz no espectro dos outros canais utilizados na mesma célula. Considerando as células restantes, podemos então arbitrar a reutilização pela célula 4 (Barra da Tijuca) dos canais 2 e 5, e pela célula 5 (Campo Grande) dos canais 1, 4 e 7.

Com o padrão para a reutilização de freqüências definido, torna-se aconselhável a realização de uma verificação da obediência à distância mínima entre células de mesma freqüência, pela determinação dos níveis de atenuação atuantes para as distâncias que separam estas células. Pela figura IV.10 podemos verificar que o caso mais crítico deve ser o da separação entre as células 2 e 4, cuja distância situa-se em torno de 8 Km. Para esta distância, a atenuação para um perfil suburbano em II.9 é da ordem de:

$$L_t = 61 + 20 \log_{10} 8 + \left((20 \log_{10} 8 - 1)^2 + 64 \right)^{1/2} \quad (\text{dB})$$

$$L_t = 97,9 \text{ dB}$$

Tal atenuação incidindo sobre a emissão de uma estação móvel situada no perímetro de uma destas células deve situar o nível de interferência co-canal atuante em uma estação móvel se deslocando no perímetro da outra célula considerada em um valor em torno de -60,9 dBm, que ainda é aproximadamente 14 dB inferior à potência mínima requerida no receptor (-46,6 dBm) para a manutenção da relação sinal/ruído mínima de 20 dB no perímetro da célula. Desta forma, se o caso mais crítico de separação atende às especificações de separação de células de mesma freqüência para o sistema, podemos considerar que esta disposição se adapta ao alto padrão de serviço que este sistema se propõe a prestar para os seus usuários.

CAPÍTULO V

Análise

Com a definição dos valores a serem considerados no projeto do sistema, podemos então partir para uma breve análise dos resultados obtidos em função das limitações impostas pelas características do tipo de serviço a ser oferecido e pelo aspecto dinâmico das conexões, dado pelo deslocamento contínuo das estações por toda a área coberta.

V.1 - Avaliação

Em se tratando de um sistema móvel de comunicação, a principal medida do desempenho obtido pelo mesmo dentro de seu ambiente de aplicação deve considerar os mecanismos por ele utilizados na minimização dos efeitos da instabilidade do canal de comunicação. A utilização de limites de confiabilidade e disponibilidade, dentro dos quais o sistema apresente um nível de serviço aceitável para seus usuários, torna-se a base para a definição de valores de projeto para os diversos componentes deste sistema. Os níveis de confiabilidade e de disponibilidade adotados para este projeto (8×10^{-3} BER e 99% de cobertura) procuram se localizar em um meio termo, onde a disponibilidade se situa em um valor bastante alto e a confiabilidade tenta se adaptar ao fato de que, para um canal de grande capacidade de transferência (determinada em 66 Kbps), os sinais analógicos de baixa frequência que devem trafegar pelo meio de comunicação podem receber um auxílio significativo quando

da transferência pela utilização de algum tipo de redundância, preferencialmente sob a forma de duplicação de informações. Tal fato, associado ao caráter não emergencial dado à transferência de imagens no atendimento, permite que os níveis de confiabilidade se situem, sem comprometimento do grau de serviço oferecido, próximos àqueles exigidos para o sinal analógico de maior freqüência (voz), para o qual a utilização de redundância pode significar a adição de atrasos que se tornem intoleráveis.

Para atender aos níveis de confiabilidade especificados e em se considerando a atuação dos agentes interferentes e as variações constantes no nível de sinal recebido, a adoção de um método de modulação apropriado é decisiva para a implantação de um sistema robusto. A opção por métodos diferenciais se mostra mais simples e resistente, principalmente pela menor influência que sofre da deformação de tempos inserida pelas diversas opções de caminho de propagação oferecidas ao sinal. Entretanto, a diferença obtida entre o desempenho dos diversos métodos de modulação considerados na implementação de sistemas móveis de comunicação é bastante sutil, o que sugere que opções outras que as tomadas neste trabalho podem demonstrar eficiência similar, não devendo porém serem negligenciadas as limitações econômicas impostas para a implantação do sistema num país que vive um momento de indefinições como o nosso.

A escolha do formato de transmissão utilizado mostra-se uma opção de compromisso entre a confiança exigida para as mensagens que trafegam no canal e a vazão efetiva de informações por ele proporcionada. Como o primeiro argumento

pretende ser o de maior peso neste trabalho, a adoção do formato EEA, cuja maior desvantagem é justamente a baixa vazão proporcionada pela inserção metódica de um segmento de verificação de erros para cada seqüência de 64 bits de dados, parece ser a solução que torna mais robusta a comunicação. Note-se entretanto que, na determinação dos níveis de vazão proporcionados, o tamanho de pacote adotado como ótimo pode ser revisto de acordo com o desempenho obtido quando da implantação do sistema, pois a ausência de informações relativas ao tamanho médio das mensagens geradas em um sistema de telemedicina e de uma idéia mais precisa da variação deste parâmetro com o aumento da taxa de transferência em um canal de comunicação instável, tende a tornar esta escolha bastante intuitiva.

O caráter aleatório da geração de informações pelas diversas estações que cobrem uma determinada área do sistema torna bastante favorável o uso de canais compartilhados entre as mesmas. Na apresentação das opções para a disciplina de acesso utilizada, excluindo-se a dilatação do espectro por motivos tecnológicos, a ausência de um estudo unificado do desempenho das mesmas, que considere o levantamento de suas características para um perfil único de aplicação, deixa dúvidas quanto ao seu desempenho relativo em função dos valores de projeto definidos e quanto aos valores absolutos de eficiência alcançados, podendo então serem estes parâmetros revistos. Parece ser entretanto seguro se confiar no melhor desempenho obtido por disciplinas que condicionem o acesso à monitoração do estado de um canal auxiliar mantido por uma estação base. Note-se ainda que a grande limitação

para o uso de métodos de escuta, que é o tempo de propagação de um pacote no meio, não deve influir significativamente dentro da topologia considerada, pois o atraso normalizado de propagação definido na fórmula IV.4 tem seu valor para a maior distância de transferência encontrada (20 Km) de $a \approx 0,004$, abaixo portanto do valor de 0,01 considerado para a obtenção das características de propagação dos diversos métodos na figura IV.3 .

Na determinação do nível de sinal requerido na recepção pelas estações componentes do sistema, a forte dependência dos níveis de interferência e de ruído encontrados com o perfil de ocupação da área considerada sugere a adoção de modelos estatísticos na obtenção de sua distribuição pelos possíveis caminhos de deslocamento das estações. Como o levantamento destes modelos carece de recursos que não nos são disponíveis no momento e graças à ausência de trabalhos que se dediquem à obtenção destes valores na região, a solução adotada se baseou em modelos sugeridos na literatura consultada, o que sugere a flexibilização dos valores obtidos quando da implantação do sistema se assim se torne necessário, sendo também importante neste momento a reavaliação da influência relativa de todas as fontes de ruído e interferência atuantes para a determinação daquela com maior grau de influência nas diferentes áreas cobertas. Mas apesar destas considerações, pudemos notar que os valores obtidos e arbitrados na definição do nível mínimo de sinal mantêm uma boa relação com os adotados e diversas publicações consultadas, como por exemplo a margem de 17 dB adotada para a superação da atenuação por multicaminhos num

ambiente urbano.

A obtenção dos limites de cobertura para as estações base utilizou como princípio a homogeneidade do relevo e da distribuição de edificações dentro das áreas classificadas como urbanas, suburbanas e rurais na região a ser coberta, fato que não é verdadeiro mas que se atém à proposta deste trabalho, que é a obtenção da base de implantação de um sistema digital de comunicação através de uma metodologia simples e direcionada, o que justifica que não seja dada maior importância à obtenção de especificações que considerem um maior nível de detalhamento dos parâmetros. Entretanto, o próprio conceito celular adotado na seqüência do projeto permite a minimização dos efeitos das possíveis alterações nos limites de cobertura pela adoção de valores relativos, onde a área de uma célula é dinâmica e dada pelo valor obtido para a relação entre sinal e ruído/interferência durante o trajeto de uma estação móvel pela mesma, face aos valores obtidos em relação às outras estações nas imediações do deslocamento. Note-se que mesmo sistemas celulares atualmente implantados adotam formatos de célula regulares que permitem uma melhor manipulação matemática, apesar do conhecimento de que na realidade o perfil destas células é bastante irregular.

Finalmente, a definição pelo uso de uma topologia celular para o sistema atende de forma bastante atraente aos propósitos do mesmo. A capacidade de transferência do canal permite que os efeitos da comutação entre células sejam minimizados, e os altos níveis pretendidos para a relação entre sinal e ruído/interferência dentro das células

possibilitam também a minimização da ocorrência de pontos mortos. Note-se que os limites de tempo envolvidos não são quantificados, sendo sua determinação postergada para o início de operação do sistema e devendo por isso serem encarados como parâmetros de ajuste. Um problema que talvez venha a se manifestar na prática quando se estabelecerem os limites para a taxa de geração de mensagens em uma conexão móvel-base pode ser a sobrecarga dos canais nas áreas de maior densidade de ocupação. As soluções imediatas seriam então a adição de mais canais de comunicação ao conjunto que serve a estas áreas e o uso da divisão celular, criando-se células menores que permitam a obtenção de uma melhor relação entre o número de usuários e o de canais disponíveis.

A distribuição física das estações base pela região também deve ser encarada como uma solução flexível, passível de alterações de acordo com as implicações econômicas e organizacionais envolvidas, prevendo-se também que quando da implantação podem ser levantados obstáculos operacionais à instalação das estações pelo maior detalhamento do perfil da área escolhida.

V.2 - Sistemas digitais versus sistemas analógicos

Aproveitando-se o momento criado pelo projeto de implantação de redes de telefonia móvel em algumas capitais do país (mais precisamente Rio, São Paulo e Brasília), podemos abrir um espaço de avaliação sobre a escolha entre a utilização de técnicas digitais ou analógicas para a prestação de tais serviços, com base nos resultados obtidos e nas consultas realizadas à literatura no decorrer do

trabalho.

Uma das grandes limitações encontradas na implementação de um sistema de comunicação digital que transmita informações analógicas é a expansão da faixa de frequências necessária à transferência desta informação. Os sistemas de comunicação que transmitem voz digitalizada em canais dedicados operam com taxas de transferência dificilmente inferiores a 16 Kbps, o que fornece uma faixa de passagem de aproximadamente 32 KHz se considerarmos modulação DPSK. Por outro lado, alguns sistemas analógicos trabalham com faixas tão estreitas quanto 12,5 KHz usando modulação FM, garantindo uma ocupação muito mais eficiente de um espectro de frequências já bastante limitado. Uma das formas de se minimizar este problema é a adoção de modulação multinível (QPSK , por exemplo), que pode entretanto ser inviabilizada pela complexidade exigida na detecção em ambientes afetados por severa degradação dos sinais, pois a margem de variação na mudança de estado do sinal é drasticamente reduzida. Em contrapartida, a possibilidade de compartilhamento de um canal digital por vários usuários incrementa sobremaneira o seu aproveitamento, podendo este fato mascarar os efeitos da subutilização do espectro, principalmente em aplicações onde as tentativas de transferência ocorrem em rajadas como na transmissão de voz digitalizada. Note-se entretanto que torna-se necessária a adoção de uma administração eficiente deste compartilhamento, que se adapte da melhor forma às condições de instabilidade presentes na comunicação com estações móveis.

Outra vantagem dos sistemas analógicos é a facilidade de implantação, decorrente sobretudo do enorme conhecimento acumulado sobre este tipo de sistema em anos de utilização nos mais diferentes ambientes. Seria um enorme erro entretanto considerar tal entrave como determinante na escolha da técnica utilizada, pois em um país que se propõe a obter capacitação tecnológica em níveis próximos ao estado da arte na área de comunicação, a falta de investimento em novas tecnologias, mesmo em ambientes acadêmicos, é bastante questionável.

Como vantagens inquestionáveis dos sistemas digitais podemos enumerar entre outras a robustez que proporciona ao canal de comunicação, através da monitoração de suas condições e do controle, transparente ao usuário, que permite serem exercidos sobre o mesmo; a possibilidade da adoção de métodos de correção de erros, que permitem a utilização de comunicação confiável em canais com ausência de retorno (como os que acionam dispositivos portáteis de sinalização); a flexibilidade na determinação dos caminhos utilizados por uma mensagem para sua captação no ponto de destino; a adaptação à transferência de inúmeros tipos de informação digitalizada, que permite a integração de novos serviços com a evolução de um sistema; a segurança, graças à possibilidade de codificação das informações (através de criptografia, por exemplo) e da limitação de acesso à determinados recursos através de senhas; e a participação em uma tecnologia que se apresenta em constante evolução, permitindo a assimilação a cada dia de novos conceitos e serviços que buscam melhorar o desempenho destes sistemas. Finalmente, a aplicação de

técnicas digitais na comunicação permite a integração ao sistema que dela se utilize de todos os conceitos e recursos disponíveis para o tratamento digital de informações, sendo esta uma das grandes metas da informática nesta década (vide a evolução de padrões para a integração de serviços como o ISDN).

Por todos estes motivos queremos crer então que as autoridades envolvidas na implementação do plano de telefonia móvel no país deveriam abrir perspectivas para a aplicação de técnicas digitais na construção destes sistemas, ou pelo menos em sistemas piloto que se proponham a atingir uma comunidade reduzida de usuários, como é o caso, permitindo desse modo a criação de um foco de capacitação tecnológica no país em um campo de conhecimento que se propõe a ter importância fundamental nos serviços de comunicação do futuro.

V.3 - Técnicas auxiliares

Como contribuição para o desenvolvimento de sistemas móveis de comunicação digital, serão apresentadas agora opções de projeto não exploradas neste trabalho mas que, de acordo com o comportamento do sistema quando de sua implantação, podem auxiliar no incremento de seu desempenho, ou mesmo serem adicionadas gradualmente de acordo com a evolução da relação entre custo e desempenho por elas proporcionada.

V.3.1 - Controle de erros

Como primeira alternativa podemos avaliar a implementação de técnicas de controle de erros para as mensagens circulantes nos canais de comunicação, para o caso dos níveis de erro nos mesmos se situarem em valores que ocasionem degradação significativa na qualidade de serviço oferecida pelo sistema.

Existem basicamente dois tipos de erros na comunicação: os isolados (ou randômicos), caracterizados por ocorrências isoladas em bits situados em qualquer parte de um bloco de informação; e os erros agrupados, que atingem um grupo de bits de informação de número limitado e são separados por regiões livres de erros (espaços de guarda) cuja extensão obedece a um limite inferior. Note-se, entretanto, que um grupo em erro pode conter bits de informação corretos e que, numa interpretação menos rígida, as regiões livres de erros devem possuir uma densidade de erros abaixo de determinado limite (possibilitando a existência de erros isolados nos mesmos). Algumas técnicas utilizadas no controle de erros são voltadas especificamente para um destes dois tipos. Entretanto, pelas características de instabilidade dos canais considerados neste trabalho, nos deteremos basicamente na avaliação de técnicas que visem o controle de ambos os tipos. Cabe aqui observar que tais canais favorecem a adoção de técnicas de controle de erros agrupados, e que algumas técnicas de modulação diferencial propagam a ocorrência do erro a um ou mais bits subsequentes à perturbação, podendo formar um erro agrupado a partir de um erro isolado.

Limitações práticas, entretanto, permitem que surja uma parcela de erros que burle o controle realizado, formando uma classe de erros não detectáveis que deve ser mantida a um nível mínimo e que neste estudo não será considerada, supondo-se que as técnicas utilizadas reconheçam quando um número de erros ultrapassa sua capacidade de detecção/correção, e que cubram todas as combinações de código possíveis. Além disso, admite-se que o controle da transferência é completado nos níveis superiores de protocolo, cuja capacidade de processamento é também utilizada na detecção e correção de inconsistências (sempre que possível), com adoção de pedidos de retransmissão quando se tornar necessário.

Há três formas básicas de realizar o controle de erros: através de sua correção, posterior ao recebimento da informação; através da detecção e solicitação de retransmissão da informação (de aplicação já prevista no projeto original através da 'Frame Check Sequence' embutida no formato EEA); e pela adoção de uma fórmula híbrida utilizando as duas fórmulas anteriores. Nos próximos itens descreveremos estas técnicas e suas características principais, avaliando sua efetividade e aplicabilidade em sistemas de terminais móveis.

V.3.1.1 - Correção de erros

Os códigos de correção de erros tem como função principal a redução ou mesmo eliminação de erros encontrados na seqüência de informação recebida, sendo independentes do conteúdo da mesma. Tais códigos se apresentam na forma de

redundâncias adicionais à mensagem (numa proporção que pode normalmente chegar a 1 bit de redundância para cada bit de informação) que permitem detectar e localizar um número pré concebido de erros isolados e/ou agrupados, sendo que a correção a partir deste limite se torna inviável ou improvável. Torna-se necessária então a avaliação da efetividade de um código em determinada aplicação, considerando fatores como nível de ruído, complexidade do código, vazão permissível, etc. Podemos então apresentar os principais códigos de correção utilizados, para posterior avaliação.

V.3.1.1.1 - Códigos de bloco BCH (BOSE - CHAUDHURI - HOCQUENGHEN)

São também chamados códigos (n,m,t) , onde um bloco de 'm' símbolos codificados a partir de um código de 'n' bits é enviado, permitindo a correção de até 't' erros nos símbolos recebidos [3]. Tais blocos são voltados basicamente para a correção de erros isolados. Entretanto, a adoção de correção entrelaçada do bloco, onde a ordem de correção segue dos primeiros até os n-ésimos bits dos símbolos codificados, permite que sejam detectados tanto erros isolados como agrupados, com um número absoluto máximo de 't' erros para cada símbolo.

Um caso especial dos códigos BCH são os códigos Reed-Solomon (RS) [15], decodificados pelos mesmos algoritmos utilizados para os códigos BCH, mas que obedecem a uma lei de formação com polinômio gerador diferente.

Outra extensão dos códigos BCH é o código Golay [1] , onde o comprimento da palavra n é aumentado em uma unidade pela adição de um bit de paridade relativo à soma dos símbolos da palavra, permitindo a correção de t erros e a detecção de um erro além da capacidade de correção.

V.3.1.1.2 - Códigos convolucionais

Os códigos convolucionais são baseados em verificações de paridade realizadas para cada bloco de informação, que dependem não somente dos símbolos deste bloco, mas também dos símbolos dos blocos anteriores.

Dentro desta classe estão os códigos de difusão de Massey, onde um código Massey para correção de erros isolados é adaptado para permitir correção de erros agrupados. De acordo com BRAYER [1] , a codificação é baseada num registro de deslocamento de extensão $3X + 2$, onde X é um parâmetro de código (sendo $2X$ a extensão máxima de um grupo de erros corrigível, composto por ' X ' bits de informação e ' X ' bits de paridade, dando uma eficiência de $1/2$). Os bits de paridade são formados pela soma (módulo 2) do conteúdo de quatro posições de registros e adicionados à mensagem. A decodificação é baseada em decisões determinadas por comparação com valores limite, graças às propriedades ortogonais deste código.

Outro código do tipo convolucional é o código Gallager , que também pode se utilizar do código Massey e que possui um registro de deslocamento de extensão $B + X + K$ (onde ' B ', ' X ' e ' K ' são parâmetros de código), que é capaz de corrigir grupos

de erros de até 2B de extensão. Neste código, os bits de paridade também são formados pela soma (módulo 2) dos conteúdos de posições fixas no registro, sendo $K - 1$ posições relativas aos últimos bits a entrarem no registrador e uma posição relativa ao bit mais antigo (na outra extremidade). A decodificação também é baseada em limites e efetuada de forma adaptativa, isto é, com mudança automática entre os modos isolado e agrupado de operação, de acordo com o tipo de erro incidente.

V.3.1.1.3 - Códigos mistos

São códigos convolucionais construídos a partir de códigos de bloco, que corrigem erros isolados e agrupados. Exemplo destes são os códigos BT ('Burst Trapping'), onde cada símbolo é transmitido seguido por sua soma (módulo 2) com um bit de paridade relativo ao símbolo posterior. A decodificação é feita de forma adaptativa, utilizando técnicas convencionais (correção baseada nos símbolos puros recebidos) no caso de erros isolados, sendo que quando estes se tornarem excessivos (erro agrupado) é adotada uma forma de correção onde os símbolos do bloco afetado são determinados pela decomposição da paridade recebida (subtraindo a paridade calculada a partir do bloco posterior, recebido corretamente).

Existem ainda os códigos GBT ('Generalized Burst Trapping'), que são códigos do tipo BT aos quais foi adicionada capacidade de corrigir um certo número de erros dentro do espaço de guarda requerido pelos códigos originais, ao custo de algum incremento em sua complexidade e

de algum aumento no próprio espaço de guarda [15].

V.3.1.2 - Retransmissão

Nos casos em que as características do canal permitem que haja retorno de informação e que os atrasos envolvidos na transferência da informação não se situem à níveis críticos, surge como solução para o controle de erros a adoção da retransmissão de mensagens recebidas com erro, mediante requisição do receptor.

Tais esquemas são comumente referenciados como ARQ ('Automatic Repeat request') e se utilizam de mensagens com uma pequena parcela de redundância que permite a detecção de erros (bastante mais simples e segura que a correção) e posterior pedido de retransmissão. Os protocolos de retransmissão mais utilizados são apresentados a seguir.

V.3.1.2.1 - Retransmissão SAW (Stop-And-Wait)

O transmissor, após a conclusão da transmissão de um bloco, espera pelo retorno de um reconhecimento do receptor que pode significar recepção correta (ACK) ou incorreta (NAK). No caso de resposta negativa ou mesmo de não recepção de resposta (após um tempo máximo), o bloco é repetido até a recepção de um ACK ou o esgotamento de um número máximo de retransmissões estabelecido, considerando-se então o bloco como perdido. Seu maior inconveniente é a ineficiência na utilização do canal, devido ao tempo gasto na espera do reconhecimento para cada bloco transmitido.

V.3.1.2.2 - Retransmissão contínua

Neste tipo de retransmissão o transmissor não espera pelo retorno de mensagens de reconhecimento ao fim de cada retransmissão, realizando a transferência de forma contínua. Entretanto, os blocos enviados são identificados por um número de seqüência, e a recepção de um NAK para determinado bloco ocasiona a retransmissão de todos os blocos a partir daquele ponto, até o ponto relativo à recepção do NAK. Do mesmo modo, se o tempo máximo de resposta se esgotar para um determinado bloco, o mesmo procedimento pode ser adotado (utilizando ainda um número máximo de retransmissões). Tal esquema requer capacidade de armazenamento suficiente para reter os blocos transmitidos pelo tempo necessário, sendo bastante vulnerável a ocorrência freqüente de condições desfavoráveis na transferência da informação.

V.3.1.2.3 - Retransmissão seletiva

Como no método anterior, os blocos transmitidos são numerados de acordo com sua seqüência na mensagem. Entretanto, os blocos recebidos com erro geram o retorno de NAK's contendo seu número de seqüência, possibilitando ao transmissor identificar quais blocos necessitam de retransmissão, evitando retransmissão para blocos transmitidos corretamente. No caso de canais ruidosos, onde mesmo as mensagens curtas de reconhecimento podem ser perdidas, é interessante a adoção da retransmissão pelo recebimento de NAK's ou pela ausência de ACK's dentro de um limite de tempo.

V.3.1.3 - Modelos Híbridos

Os métodos de controle de erros discutidos apresentam desempenhos diferenciados em relação às características do canal em que são utilizados. Em canais onde o nível de sinal se mantém em uma média que permita a realização de transmissões de boa qualidade (pouca ocorrência de erros), a utilização de códigos de correção ocasiona a introdução de um atraso significativo para qualquer bloco enviado, tanto na forma de tempo de transmissão da redundância como na forma de atraso devido à codificação/decodificação das mensagens. Já em canais ruidosos o uso de retransmissão pura pode diminuir significativamente a vazão do sistema pelo incremento no número de retransmissões. Entretanto, há casos em que a densidade de erros é tão grande que excede a capacidade dos códigos de correção utilizados, sendo nestes casos imprescindível o uso de retransmissão.

Para melhor aproveitamento das características destes dois métodos foram criados os modelos híbridos, compostos por técnicas de correção e retransmissão, utilizados de forma adaptativa. Nestes modelos, a correção de erros é utilizada até o ponto em que o número de erros ultrapasse a capacidade de correção do código utilizado, sendo então utilizada a retransmissão. Alguns modelos entretanto atuam de maneira reversa, utilizando técnicas de retransmissão e reservando a adoção de códigos corretivos para quando estes proporcionam aumento na efetividade da transferência.

COMROE et alia [10] apresentam dois tipos de modelos híbridos. No primeiro, a mensagem e os bits de paridade para

detecção de erros são codificados com algum tipo de código de correção de erros, sendo que a decisão de retransmissão é baseada em parâmetros apropriados para o código utilizado. No segundo, a mensagem é transmitida inicialmente com bits de paridade para detecção de erros adicionados. Caso a recepção acuse erro, os bits de paridade de correção de erros relativos à mensagem são transmitidos, sendo que sua recepção correta permite a recuperação do erro. Segundo os autores, mesmo se as duas partes forem recebidas com erro elas podem ser combinadas e utilizadas na recuperação da mensagem.

DRAJIC et alia [15] apresentam critérios de decisão para a utilização de retransmissão de modelos híbridos compostos por códigos de correção de blocos e convolucionais. Para os códigos de correção de bloco a decisão é baseada na geração das raízes de polinômio de decodificação, havendo retransmissão para o caso de seu número diferir do grau do polinômio. Para os códigos convolucionais a decisão é baseada na extensão dos erros agrupados recebidos, caso eles excedam a capacidade de correção do código.

V.3.1.4 - Avaliação

Na avaliação da eficiência dos métodos de controle de erros em canais de comunicação para sistemas com terminais móveis, devem ser considerados seus comportamentos em relação às condições de propagação encontradas. Para isso devem ser avaliados parâmetros significativos, sendo que os comumente usados são a vazão, o atraso na transferência, a complexidade e o fator de aperfeiçoamento ('improvement factor'), definido como a relação entre a taxa de erro característica

do canal e a taxa de erros após a utilização do codificação.

DRAJIC et alia [15] apresentam em seu trabalho algumas curvas de desempenho obtidas através de simulação para sistemas ARQ, FEC e híbridos, utilizando-se de códigos de bloco, convolucionais e mistos. Alguns resultados são apresentados resumidamente na tabela V.1, onde os fatores de avaliação são a complexidade e o fator de aperfeiçoamento, mantendo-se os níveis de vazão aproximadamente iguais em torno de 0,5 para efeito de comparação.

Uma das principais conclusões derivadas de observação é a superioridade dos códigos convolucionais sobre os de bloco em sistemas correspondentes, sendo que em aplicações de HF, onde os erros agrupados ocorrem de forma menos densa, os códigos do tipo Gallager usados em sistemas FEC ou híbridos obtêm bom desempenho. Pode-se notar também que os sistemas híbridos quase sempre apresentam fatores de aperfeiçoamento maiores que os encontrados em sistemas FEC ou ARQ puros.

Alguns resultados apresentados por BURTON et alia [3] levam à conclusão de que os sistemas ARQ obtêm um melhor desempenho sobre os sistemas FEC, graças à simplicidade e eficiência dos códigos de detecção de erros (contrastando com a complexidade e as limitações dos códigos de correção). Entretanto, os avanços na tecnologia de codificação/decodificação nos últimos anos, aliados ao fato de que existem complicações relacionadas com a disponibilidade e confiabilidade de canal de retorno, tornam bastantes frágeis tais afirmações, sendo mais razoável considerar-se a utilização de sistemas híbridos, bastantes

viáveis nos dias de hoje.

Tipo do sistema	Eficiência	Fator de aperfeiçoamento	Complexidade de decodificação
ARQ Go-back-2 (63,32) cíclico	0,45	36	147
FEC (15,7,2) i=40	0,466	14	714
FEC híbrido (15,7,2), i=40	0,465	39	714
FEC RS (7,4,1)	0,571	23	1163
RS híbrido (7,4,1)	0,558	40	1163
BT (20,10,2)	0,5	13	800
BT híbrido (20,10,2)	0,467	27	800
GBT (10,5,1) (20,10,2)	0,5	17	800
GBT híbrido (10,5,1) (20,10,2)	0,491	47	800
Gallager (x=20)	0,5	10	1050
Gallager híbrido H1 (x=260)	0,465	102	1050
Gallager híbrido H2 (x=260)	0,489	51	1050
Massey (x=32)	0,5	48	196
Massey híbrido (x=32)	0,46	98	196

Tabela V.1 - Comparação do desempenho de técnicas de controle de erro por simulação (DRAJIC [15], tabela 2).

Resultados mais específicos para sistemas de terminais móveis são apresentados por COMROE [10], cujo estudo é voltado principalmente para modelos híbridos e que considera como principal fator de avaliação a vazão da informação (eficiência de transmissão). Note-se que neste trabalho são considerados a sensibilidade da vazão em relação à perda de cabeçalho e à perda de ACKs, sendo a última decorrente de perturbações no canal de retorno. Tais fatores não são considerados com as proporções devidas nas outras publicações mencionadas.

Para avaliar o desempenho dos modelos híbridos considerados, os autores levantam curvas a partir de métodos analíticos e por simulação. A partir das curvas construídas (figura V.1), podemos notar que para taxas de atenuação por multicaminhos menores, a vantagem na aplicação de correção de erros sobre a detecção pura é diminuída. Desse modo, a retransmissão pura é mais eficiente para tais condições, enfrentando entretanto altos níveis de degradação para taxas de atenuação maiores, onde os métodos de correção tem melhor atuação.

Outro resultado importante é a grande sensibilidade a erros e a eficiência apresentada por modelos adaptativos com retransmissão seletiva, onde são concatenados o uso da detecção e da correção de erros de acordo com as condições do canal. Outros fatores devem entretanto serem considerados, como o aumento da complexidade e o fator de aperfeiçoamento.

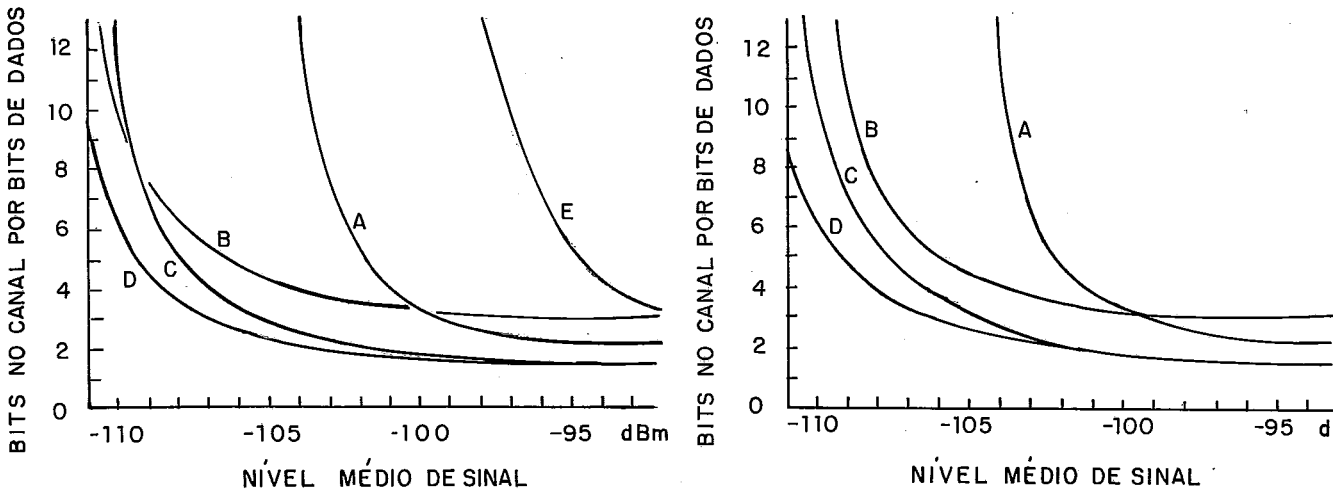


Figura V.1 - Inverso da eficiência de transmissão a velocidades de 20 mi/h com atenuação devida a multicaminhos. a) ARQ tipo I (detecção e FEC), b) ARQ tipo I com retransmissão seletiva, c) ARQ com retransmissão seletiva , d) ARQ tipo II (com detecção ou FEC) com retransmissão seletiva e e) ARQ simples (COMROE [10], figuras 13 e 14).

Num trabalho que se propõe a definir e avaliar a eficiência de uma estratégia híbrida de controle de erros para uma rede de pacotes via rádio, TOLEDO [41] optou pela integração de um código corretor de erro do tipo BCH e um protocolo de retransmissão SAW. Seus resultados demonstram um aumento considerável no desempenho do sistema com a utilização da correção de erros em relação ao desempenho conseguido com a utilização de um esquema ARQ puro (com uma redução da probabilidade de retransmissão de um pacote de 1024 bits de 60% para 10%). Suas maiores críticas em relação á utilização de FEC entretanto se centralizam na

redução da velocidade de decodificação e no incremento da complexidade de implementação em relação a outras técnicas de controle de erro. Note-se porém que esta implementação foi realizada por 'software', devendo ser esperado um desempenho muito melhor em relação a estes parâmetros se a correção ou pelo menos uma de suas parcelas for realizada por 'hardware'.

Finalmente, pode-se concluir que, com os avanços na área de codificação para correção de erros, os grandes benefícios derivados do uso de modelos híbridos adaptativos podem tornar-se disponíveis a um custo razoável, considerando-se o aumento na complexidade e a degradação do serviço a nível de usuário (em termos de atraso e disponibilidade do canal). Deve-se entretanto determinar o nível de confiança requerido para o sistema de acordo com as necessidades reais e a disponibilidade de recursos, pois os modelos simples podem ser utilizados em aplicações específicas, correspondendo satisfatoriamente às expectativas de qualidade de serviço.

V.3.2 - Diversificação

A diversificação na transferência da informação consiste em efetuar a mesma de forma redundante, para que os sinais transmitidos encontrem condições de propagação diferentes e sejam independentes o suficiente para que os níveis de atenuação e interferência na recepção não sejam relacionados. No estudo das técnicas mais utilizadas, torna-se necessário o conhecimento de algumas definições.

- . Distância de coerência - é a distância mínima entre dois pontos (de transmissão ou recepção) para quais os sinais associados não são fortemente correlatos. Assume valores da ordem de meio comprimento de onda em localidades urbanas.
- . Faixa de coerência - é a distância mínima de freqüência entre dois sinais para qual os atrasos de propagação dos mesmos são independentes, isto é, para o qual os vários caminhos de propagação de cada um dos sinais não são correlatos. Assume valores que variam tipicamente de 30 KHz a 1MHz.
- . Tempo de coerência - é o tempo mínimo entre a transmissão de dois sinais para o qual as propagações destes sinais são independentes. Valores típicos são da ordem de 1,3 ms ou mais.

Os métodos de diversificação consistem na transmissão de um mesmo sinal em diferentes pontos, freqüências, tempos, ângulos de incidência, etc., sendo as três primeiras fórmulas as mais utilizadas. Podemos resumi-las então da seguinte forma:

- . Diversificação no tempo - a mensagem transmitida é repetida, atrasando a transferência efetiva da informação. Se o período entre as mensagens for suficientemente grande (maior que o tempo de coerência), estas são independentes e poderão encontrar diferentes situações de propagação, aumentando a probabilidade de recepção. Pode-se notar

que movimentos vagarosos de veículos tornam pouco efetiva tal diversificação para períodos entre mensagens pequenos. Além disso, há problemas de introdução de atrasos na utilização do canal.

. Diversificação em frequência - o sinal é transmitido com diferentes frequências, nas quais os problemas de propagação associados não se relacionam (são independentes). Em outras palavras, a separação entre as frequências é suficientemente maior que a faixa de coerência. A maior desvantagem é o aumento de uso do espectro.

. Diversificação no espaço - é concebida através da separação entre as antenas transmissoras e/ou receptoras de um conjunto, de tal modo que seus sinais individuais sejam suficientemente independentes, ou seja, o espaço entre elas deve ser maior que a distância de coerência. Usualmente as estações-base possuem antenas bem mais separadas, por não terem tanta limitação de espaço e para combate ao espalhamento espacial devido a obstáculos. Na diversificação na recepção, os sinais recebidos são selecionados de acordo com dois critérios principais: a diversificação na seleção, onde a antena receptora cujo sinal apresenta maior valor para a relação sinal/ruído é conectada à saída; e a combinação de relação máxima, onde os sinais são ponderados proporcionalmente à sua relação sinal/ruído e então somados. A maior vantagem desse tipo de diversificação reside na não necessidade de espectro nem de tempo

adicionais, sendo em geral a mais utilizada.

V.3.3 - Topologias alternativas

A utilização de células com uma estação base irradiando o sinal de comunicação por meio de uma antena omnidirecional tem como principal vantagem a simplicidade, pois o uso de uma única antena transmissora/receptora para cada célula possibilita economia de equipamento e evita a adoção de sistemas mais complexos no controle da comunicação. Entretanto, tais arranjos oferecem muito pouca proteção contra interferências entre as células, além do fato de que as antenas omnidirecionais são mais suscetíveis a captar ruídos indesejáveis devido ao seu caráter geral de direção de captação.

Em sistemas onde os fatores de projetos se tornem mais críticos, é interessante a análise de viabilidade de topologias baseadas na utilização de antenas direcionais, podendo estas serem dispostas de forma a simular a iluminação de uma antena omnidirecional. As principais vantagens no uso das antenas direcionais são:

- . A potência de transmissão nas diferentes antenas que formam uma célula pode ser balanceada pra controlar o nível necessário para se alcançar as unidade móveis nos diferentes setores das células, diminuindo a potência que seria necessária para a irradiação por uma antena omnidirecional, que causa maior interferência. Ainda pode ser adotado um sistema de alocação dinâmica da fonte do sinal, sendo escolhida

para a comunicação a antena que apresentar melhor relação sinal/ruído para o terminal móvel (diversificação espacial).

- . A montagem das antenas nas laterais de torres de suporte, ao invés da sua utilização no topo, possibilita a diminuição da interferência na irradiação causada pela própria estrutura;
- . A interferência co-canal é diminuída pelo simples fato de que duas células, que partilham os mesmos canais, podem distribuí-los entre as diferentes antenas de maneira a evitar que antenas com canais iguais se coloquem frontalmente uma à outra.

Outro fator atenuante é a mínima interferência ocasionada pelas antenas equivalentes de outras células que não estejam apontadas diretamente para o veículo desejado.

SUNDBERG [39] descreve alguns dos possíveis padrões de disposição de antenas direcionais na iluminação de célula (figura V.2), devendo entretanto sua utilização ser avaliada em função da alteração na relação custo/desempenho do sistema.

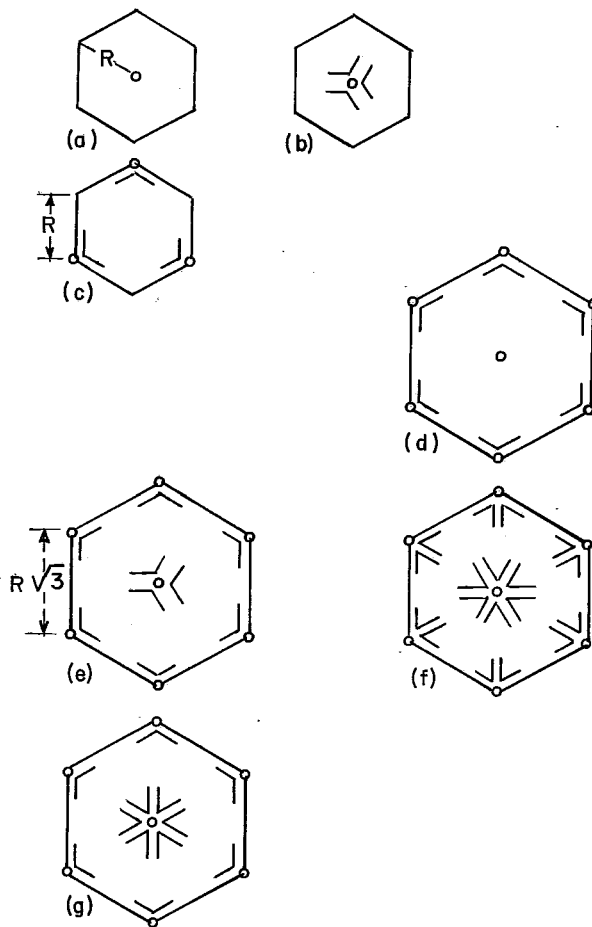


Figura V.2 - Alguns padrões de disposição de antenas numa célula (SUNDBERG [39], fig. 5).

V.3.4 - Dilatação de espectro

Nas técnicas de dilatação do espectro o sinal transmitido ocupa uma faixa de frequências maior que a mínima necessária para o envio de informação, isto é, a energia dos dados é espalhada pelo espectro tornando a relação sinal/interferência muito baixa. A seqüência de dados a ser transmitida é codificada em um sinal de banda muito maior que a taxa de dados. A recepção é realizada de forma sincronizada, visando a decodificação correta da seqüência

recebida e a conseqüente recuperação dos dados. O espalhamento da informação em uma faixa grande de freqüências dá à mesma certa imunidade à interferências, pois estes sinais de interferência atingem somente uma parte do espectro (instantaneamente), não conseguindo em muitos casos interferir efetivamente na transmissão (principalmente se forem utilizados códigos de correção de erros).

Outras vantagens relacionadas por PICKHOLTZ et alii [33] são :

- . Possibilidade de múltiplos usuários com acesso randômico ao meio de comunicação, cujo número pode ser aproximado por $Gp/10$. Gp é o ganho de processamento, isto é, a razão entre a dimensionalidade do espaço possível do sinal (banda de dilatação) pela dimensão necessária para transmitir o sinal básico (banda mínima para transmissão de sinal).
- . Quando o número de usuários ativos excede o valor limite ($Gp/10$), o resultado é uma degradação de desempenho para todos os usuários, sem que novos acessos sejam bloqueados (degradação suave).
- . Cada usuário pode ter seus dados codificados de uma única forma, evitando por exemplo a comutação de canal ou mudança de endereçamento à medida que uma unidade móvel se desloque entre células num sistema celular.
- . Informações de emergência (prioritárias) não necessitam de canais dedicados para envio das mensagens ou do bloqueio de usuários. A transmissão pode ser feita

umentando-se o nível de potência do sinal de emergência.

- . Pouca propabilidade de escuta indevida , pois originalmente somente os receptores autorizados conhecem a seqüência de decodificação.

V.3.4.1 - Técnicas de dilatação

As técnicas de dilatação mais utilizadas, de acordo com PICKHOLTZ et alii [33] e MUNDAY [29], são:

- . Seqüência direta, onde cada usuário possui seu próprio código, que é aproximadamente ortogonal (isto é, possui pouca correlação) aos códigos de outros usuários. Nesta técnica uma seqüência pseudo-randômica rápida gerada pelo transmissor (e conhecida pelo receptor) é usada para causar transições de fase na portadora de dados. Um grande problema associado a esta técnica é o chamado 'near - far problem'. O fato de que os usuários são separados geograficamente possibilita que um receptor , tentando detectar o sinal de uma estação distante , sofra interferências de uma estação mais próxima cujo sinal recebido é bem mais forte (pouca atenuação) e com freqüência de transmissão próxima.
- . Deslocamento de freqüência ('frequency hopping') onde a portadora é obrigada a deslocar sua freqüência de acordo com uma seqüência pseudo-randômica . Os padrões de deslocamento de freqüência para cada usuário são aproximadamente ortogonais. O problema de 'near-far' é então contornado, pois em sistemas com número razoável

de usuários é pouco provável existir mais de um usuário utilizando a mesma frequência instantaneamente. Com o aumento do número de usuários, pode ser adotado o uso de técnicas de correção de erros, para suavizar os efeitos de interferência entre os mesmos.

Sistemas por deslocamento de frequência podem utilizar basicamente três taxas relativas de transmissão: um salto por bit, múltiplos saltos por bit ('fast frequency hopping') e múltiplos bits por salto ('slow frequency hopping'). A escolha é feita considerando-se as características do canal sobre o qual os usuários transmitirão suas mensagens. A taxa de saltos ('hop rate') escolhida também deve considerar vários fatores, dentre os quais a sensibilidade à interferência (para saltos vagarosos a interferência em uma frequência pode ocasionar a perda de grande quantidade de informação) e o tempo de sincronização.

Técnicas de deslocamento de frequência são bastante desejáveis em sistemas móveis de comunicação por apresentarem implicitamente uma forma de diversificação em frequência que auxilia no combate à atenuação ocasionada pelos múltiplos caminhos de propagação do sinal.

Deslocamento no tempo ('time hopping'), onde são transmitidos sinais instantâneos de alta potência ocupando toda a faixa de frequências utilizada. A informação é codificada nos tempos pseudo-aleatórios entre os sinais.

- . 'Chirp', onde o sinal transmitido tem sua freqüência variada linearmente (rampa) por todo espectro disponível, sendo o processo reiniciado ao terminar a faixa.

V.3.4.2 - Geração de seqüências pseudo-randômicas

As seqüências pseudo-randômicas usadas para dilatar o espectro do sinal de informação devem obedecer, de acordo com PICKHOLTZ et alii [33], às seguintes propriedades:

- . facilidade de geração;
- . randomicidade;
- . períodos longos;
- . dificuldade de reconstrução a partir de segmentos curtos.

Os dispositivos mais utilizados para gerar tais seqüências são:

- . Registros de deslocamento com realimentação linear, que são os mais simples de construir mas apresentam como desvantagem a facilidade de reconstrução a partir de segmentos curtos. Têm como princípio a combinação linear dos bits de uma seqüência pela realimentação.
- . Registros de deslocamento com realimentação não linear, onde a função de realimentação é substituída por uma função booleana arbitrária do conteúdo dos registros implementada por ROM ou lógica randômica. Sua desvantagem provém do fato de ser uma técnica relativamente desconhecida, devendo ser mais explorada para que se possa fazer melhor uso de suas propriedades.

- . Registros de deslocamento com realimentação linear e lógica de saída não linear, onde a saída proveniente da combinação pela função booleana não é realimentada.

Entretanto, não é restritamente necessária a utilização de registros de deslocamento com realimentação para a geração de sinais em espectro dilatado, podendo ser usada qualquer técnica que gere boas seqüências pseudo-aleatórias.

V.3.4.3 - Sincronismo

Para que haja uma boa qualidade de serviços é necessário que aquisição de dados seja feita de maneira rápida e segura. Para isto é necessário se ter bons mecanismos de sincronização no receptor. Alguns métodos de sincronização bastante utilizados são:

- . Correlação de declive ('slide correlation'), onde a base de tempo do receptor é variada de forma a varrer o sinal utilizado para transmissão em suas possíveis faixas de frequência. Desse modo, o receptor em dados momentos entra em sincronismo com o transmissor e o nível de tensão de um integrador assume valores acima de determinado limite, o que indica a detecção de sincronismo. As duas principais desvantagens deste método são a dificuldade na determinação do limite de tensão para sincronismo e o tempo de sincronismo, que pode ser diminuído pela limitação da faixa de variação de frequências de transmissor e receptor inicialmente até que o sincronismo seja alcançado. Pode ser usada também a transmissão de seqüências de sincronização no

começo das mensagens.

- . Estimacão seqüencial, onde é capturada uma seqüência do sinal dilatado em registradores. Esta seqüência é então comparada com outra, gerada localmente no próprio receptor. Se os sinais forem suficientemente correlatos será gerado um sinal de tensão em um integrador com nível superior a um limite pré-determinado. Se não, o processo é repetido até a conseqüente obtenção de sincronização.

V.3.4.4 - Avaliação

Pode-se notar com destaque os aspectos favoráveis dos métodos de dilataçãõ de espectro baseados na variaçãõ temporal da freqüência de transmissãõ, pela excepcional diversificaçãõ que permite em uma implementaçãõ onde os principais fatores de instabilidade têm caráter seletivo em relaçãõ à freqüência dos sinais envolvidos. Como estes métodos entretanto ainda não possuem considerável difusãõ tecnológica, sua adoçãõ em um sistema compatível com a realidade nacional deve ser postergada. Note-se, apesar disso, que tais métodos têm problemas significativos que deverão ser considerados em qualquer possível aplicaçãõ, como por exemplo o uso ineficiente do espectro (pelo espalhamento de freqüências utilizado), fator que, com o avanço na utilizaçãõ de sistemas de radiocomunicaçãõ, deve se tornar cada vez mais crítico.

CAPÍTULO VI

Conclusões

Os sistemas de comunicação que envolvem a transferência de informações para/de estações móveis apresentam como principal característica a instabilidade dos canais de comunicação estabelecidos, principalmente pela atuação de atenuações e interferências no caminho de propagação dos sinais envolvidos. Tal fato favorece o uso de técnicas para esta transferência que permitam a manutenção da confiabilidade e da disponibilidade a níveis controlados, possibilitando que se obtenha o grau de qualidade exigido na especificação destes sistemas. A adoção da comunicação na sua forma digital é dessa forma fator primordial na elevação desta confiabilidade, principalmente pelos maiores recursos que torna disponível para o controle dos erros introduzidos nas informações quando de seu deslocamento pelo canal de comunicação. Note-se entretanto que a comunicação digital apresenta algumas desvantagens em relação à analógica, das quais a maior parece ser a utilização menos eficiente do espectro disponível.

Para que o controle de erros seja eficaz, torna-se necessária a adoção de limites para a relação entre sinal e ruído/interferência encontrada na recepção. A quantização destes limites e o levantamento dos efeitos dos principais agentes interferentes e dos principais obstáculos encontrados no caminho de propagação dos sinais (considerando-se o perfil demográfico e topográfico médio da região

considerada), permite a avaliação das opções para o projeto do canal de comunicação que melhor se apresentem quanto à relação custo/benefício associada às mesmas.

Para a aplicação em telemedicina considerada, pode-se concluir sobre a viabilidade da manutenção dos níveis de confiabilidade e disponibilidade estipulados, apesar das dificuldades econômicas e tecnológicas que podem forçar por vezes a adoção de técnicas menos robustas no projeto do sistema, cuja avaliação no entanto deve permitir que se alcancem os objetivos propostos. Uma sugestão visando a aprimoração dos serviços oferecidos nesta aplicação é a adaptação dos equipamentos e do canal de comunicação utilizados para a transferência em tempo real de imagens, que irá permitir uma interação audiovisual bastante completa entre as estações. Note-se entretanto que as maiores limitações impostas à tal configuração para o sistema é o grande volume de informações envolvido neste tipo de transmissão, que deve tornar bem mais difícil e complexa sua definição.

Pode-se notar ao longo do trabalho que o projeto de um sistema de comunicação envolve a adoção de soluções de compromisso, onde quase sempre é feita uma opção entre métodos robustos e complexos e métodos menos eficientes, porém com maior capacidade de adaptação às realidades econômicas e operacionais do serviço considerado.

Devemos lembrar ainda que, devido à grande interação de um canal de comunicação estabelecido através de enlaces de rádio difusão com o perfil do terreno por sobre o qual

trafegam os sinais, os sistemas móveis de comunicação têm comportamentos bastante variáveis dentro dos diferentes ambientes encontrados na área coberta, o que determina a grande importância de que, em uma etapa agregada à implantação do sistema, seja realizada uma constante verificação da adaptação dos métodos propostos e de seus parâmetros de ajuste, procurando se encontrar para os mesmos o ponto ótimo de desempenho nas condições consideradas.

O presente trabalho se propõe a fazer um levantamento das técnicas atualmente disponíveis para a elaboração de um sistema móvel digital de comunicação, procurando determinar quais as que melhor se adaptam à implantação de um sistema de comunicação robusto e confiável. Neste ponto deve ser então colocadas algumas sugestões que orientem a elaboração de estudos e atividades que visem a implementação de tal sistema.

Como a maior dificuldade na determinação da aplicabilidade das técnicas estudadas se deveu à falta de dados provenientes de levantamentos estatísticos das características de propagação de sinais e de incidência de ruídos na região considerada, uma primeira sugestão seria a realização de tais levantamentos, onde se procure estabelecer um perfil de atenuações e interferências aproximado para esta região. Tais informações devem permitir que numa etapa posterior seja avaliado o comportamento das diferentes técnicas sugeridas neste trabalho em relação às condições reais de utilização, sendo possível até a adoção de opções alternativas às apresentadas face ao desempenho esperado.

Já que o sistema engloba a comunicação entre as diversas estações base e o centro de comutação, além da comunicação entre este centro e os próprios hospitais aos quais pertencem as ambulâncias, torna-se fundamental a definição posterior destas conexões, bem como dos recursos utilizados para o processamento das informações envolvidas.

Finalmente, como o objetivo maior é a implementação do sistema, uma outra etapa deve constar do levantamento dos equipamentos disponíveis no mercado (nacional e internacional) para sua construção, devendo ser ainda avaliada a viabilidade de desenvolvimento destes equipamentos, cujo maior benefício é a capacitação tecnológica neste segmento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRAYER, KENNETH - Error Correction Code Performance on HF, Troposcatter and Satellite Channels; IEEE Transactions on Communication Technology, vol. COM-19, pt. 2, outubro/71, pp. 781-789.
- [2] BULLINGTON, KENNETH - Radio Propagation Fundamentals; Bell Systems Technical Journal, vol. 36, maio/57, pp. 593-626.
- [3] BURTON, H. O. e SULLIVAN, D. D. - Errors and error control; Proceedings of the IEEE, vol. 60, no 11, novembro/72, pp. 1293-1301.
- [4] CADMAN, P. J. e BREWSTER, R. L. - Data Transmission Over UHF and VHF Land Mobile Radio Channels; IEE Proceedings, vol. 130, pt. F, no 6, outubro/83.
- [5] CALHOUN, GEORGE - Digital Cellular Radio; Artech House , Inc., Norwood, MA, 1988, 445 p.
- [6] CARLSON , A. BRUCE - Sistemas de Comunicação ; Editora da Universidade de São Paulo/Editora McGraw-Hill do Brasil, 1981.
- [7] CHIEN, E. S. K. ; GOODMAN, D. J. e RUSSEL , J. E. - Cellular Access Digital Networks (CADN): Wireless Access to Networks of the Future; IEEE Communications Magazine, vol. 25, no 6, junho/87.
- [8] CHUNG , K. - Generalized Tamed Frequency Modulation and its Application for Mobile Radio Communications; IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol SAC-2, no 4, julho/84, pp. 487-497.

- [9] CLARK, A. P. - Digital Modems for Land Mobile Radio ; IEEE Proceedings, vol. 132, pt. F, no 5, agosto/85, pp. 348-362.
- [10] COMROE, R. A. - ARQ Schemes for Data Transmission in Mobile Radio Systems; IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. SAC-2, no 4, julho/84, pp. 472-481.
- [11] COUCH II , LEON W. - Digital and Analog Communication Systems; MacMillan Publishing Co.,Inc. , 1983.
- [12] COX, DONALD C. - Universal Digital Portable Communications - A System Perspective; IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. SAC-5, no 5, junho/87.
- [13] DAVIS, B. R. e BOGNER, R. E. - Propagation at 500 MHz for Mobile Radio ; IEEE Proceedings , vol. 132, pt. F, no 5, agosto/85, pp. 307-320.
- [14] DELISLE, G. Y.; LEFEVRE, J.; LECOURS,M. e CHOUINARD, J.- Propagation Loss Prediction: a Comparative Study with Application to the Mobile Radio Channel; IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-34, no 2, maio/85, pp. 86-96.
- [15] DRAJIC, D. e VUCETIC, B. - Evaluation of Hybrid Error Control Systems; IEEE Proceedings, vol. 131, pt. F, no 2, abril/84, pp. 183-193.
- [16] DUFF , WILLIAM G. - Mobile Communications ; Don White Consultants Inc., 1976.
- [17] GLANCE, B. S. - BER Degradations Caused by Switching in Digital Mobile Radio Systems Using Base Station Diversity; Bell Systems Technical Journal, vol. 63, no 4, abril/84.

- [18] GUPTA, S.C. ; VISWANATHAN R. e MUAMMAR, R. - Land Mobile Radio Systems - A Tutorial Exposition; IEEE Communications Magazine, vol. 23, no 6, junho/85, pp.34-45.
- [19] HAMSHER, DONALD H. - Communication System Engineering Handbook; McGraw-Hill Book Company, 1967.
- [20] HOYLE , ROBERT D. e FALCONER, DAVID D. - A Comparison of Digital Speech Coding Methods for Mobile Radio Systems ; IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. SAC-5, no 5, junho/87.
- [21] HUGHES, C. J. e APPLEBY, M. S. - Definition of a Cellular Mobile Radio System; IEE Proceedings, vol.132, pt.F, no 5, agosto/85, pp. 416-424.
- [22] HUI, J. Y. N. - Multiple Accessing for the Collision Channel without Feedback; IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.SAC-2, no 4, julho/84, pp. 572-582.
- [23] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - Spectrum Utilization and Monitoring; Recommendations and Reports of the CCIR, vol I, 1986.
- [24] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - Land Mobile Service, Amateur Service, Amateur Satellite Service; Recommendations and Reports of the CCIR, vol VIII-1, 1986.
- [25] KLEINROCK, L. - Queueing Systems . Volume II : Computer Applications; John Wiley & Sons, New York, 1976, 549 p.

[26] LI, VICTOR O. K. e YAN, TSUN-YEE - Adaptive Mobile Access Protocol (AMAP) for the Message Service of a Land Mobile Satellite Experiment (MSAT-X); IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. SAC-2, no 4, julho/84, pp. 621-627.

[27] MABEY, P. J. - Predicting the Range and Throughput of Mobile Data Systems; Philips Telecommunication Review, vol.41 no 1, abril/83, pp. 55-62.

[28] MIKI, T. e HATA , M. - Performance of 16Kbps GMSK Transmission with Postdetection Selection Diversity in Land Mobile Radio; IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. SAC-2, no 4, julho/84, pp. 512-517.

[29] MUNDAY, P. J. - Spread Spectrum Techniques for Security and Reliability; Communications International, maio/84, pp. 101-104.

[30] NAMISLO , CHRISTIAN - Analysis of Mobile Radio Slotted ALOHA Networks ; IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.SAC-2, no 4, julho/84, pp. 583-588.

[31] OTT, HENRY W. - Noise Reduction Techniques in Electronic Systems; John Wiley & Sons, 1976, pp. 287.

[32] PARSONS , J. D. e REYHAN , T. - Prediction of Bit Error Rate in the Presence of Impulsive Noise: a Numerical Approach Using Measured Noise Data; IEE Proceedings, vol. 132, pt. F, no 5, agosto/85, pp. 344-348.

[33] PICKHOLTZ, RAYMOND L. ; SCHILLING, D. L. e MILSTEIN, L. B. - Theory of Spread Spectrum Communications - A Tutorial; IEEE Transactions on Communications, vol. COM-30, no 5, maio/82, pp. 855-884.

[34] PICQUENARD, ARMEL - Propagação das Ondas Radioelétricas nos Meios Naturais. Ira. parte: teoria; Livraria Freitas Bastos S.A.

[35] ROY, C. D. - Medical Engineering ; Year Book Medical Publishers, Inc., Chicago, 1974.

[36] SCHWARZ, GERHARD - Redes de Computadores: Descrição Qualitativa de Métodos de Controle de Acesso em Redes de Rádio Difusão ou com Enlaces Via Satélite, Relatório Didático COPPE (Sistemas) - UFRJ , no ES-38/84, Rio de Janeiro, Brasil, 67 páginas.

[37] STANLEY, WILLIAM D. - Electronic Communication Systems ; Reston Publishing Company Inc., Reston, Virginia, 1982.

[38] STEELE , R. - Towards a High-Capacity Digital Cellular Mobile Radio System; IEE Proceedings, vol. 132, pt. F, no 5 , agosto/85.

[39] SUNDBERG, C. - Alternative Cell Configurations for Digital Mobile Radio Systems; Bell System Technical Journal, vol. 62, no 67, setembro/82, pp. 2037-2065.

[40] TAMBURELLI, G. ; DOGLIOTTI, R. e GARIBOTTO, G. - Telemedicine : State of the art and results on Torino - Suza Experimental Link; outubro/79.

[41] TOLEDO, FLAVIO B. - Uma Estratégia de Controle de Erro Híbrida para uma Rede de Pacote Via Rádio; Tese de M. Sc., Departamento de Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, Brasil, 1988, 87 páginas.

[42] TUXEN, L. - The Nordic Mobile Telephone System ; Philips Telecommunication Review, vol. 41, no 1, abril/83, pp. 3-16.

[43] VALVERDE, ADRIANA N. L. - Análise do Tempo Médio de Espera das Mensagens para um Protocolo de Acesso com Prioridades; Tese de M.Sc., COPPE (Sistemas) - UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1986, 160 páginas.

[44] YOSHIDA , S. e IKEGAMI , F. - A Comparison of Multipath Distortion Characteristics Among Digital Modulation Techniques ; IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-34, no 3, agosto/85, pp 128-135.