

---

# Comunicações Móveis

---

## Sumário

---

### Capítulo 1 – Introdução

1.1 – Breve histórico .....	11
1.2 – Evolução tecnológica dos sistemas .....	16
1.3 – Evolução dos esquemas de modulação .....	19
1.3.1 – Sistemas analógicos .....	19
1.3.2 – Sistemas digitais .....	20
1.4 – Evolução dos métodos de acesso .....	21
1.4.1 – <i>Simplex</i> .....	21
1.4.2 – <i>Half duplex</i> .....	22
1.4.3 – <i>Double half duplex</i> .....	22
1.4.4 – <i>Duplex</i> .....	22
1.5 – Serviços de comunicação móvel celular .....	23
1.5.1 – Serviços móvel especializados – <i>Trunking</i> .....	23
1.5.2 – Sistema móvel celular – SMC .....	24
1.5.3 – Serviço especial de radiochamadas – <i>Paging</i> .....	25
1.5.4 – Redes de dados sem fio – WLAN .....	26
1.5.5 – Telefone sem fio – <i>Cordeless Telephone</i> .....	27
1.5.6 – <i>Universal mobile telecommunication services</i> – UMTS .....	27
1.5.7 – <i>Future public land mobile telecommunication systems</i> – FPLMTS .....	28
1.5.8 – <i>Personal communication networks</i> – PCN .....	28
1.5.9 – <i>Mobile satellite systems</i> – MSS .....	29
1.6 – <i>International Telecommunication Union</i> – ITU .....	29
1.7 – ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações .....	30

## Capítulo 2 – Sistemas de comunicação móvel

2.1 – Evolução dos sistemas de comunicação móvel .....	32
2.2 – Sistema móvel celular .....	34
2.3 – O padrão de reuso .....	39
2.4 – Plano de frequência .....	42
2.5 – Arquitetura do sistema .....	46
2.6 – Componentes do sistema .....	50
2.6.1 – Estação móvel (EM) .....	50
2.6.2 – Estação rádio base (ERB) .....	51
2.6.3 – Central de comutação e controle (CCC) .....	52
2.6.4 – Controladora de estação rádio base (CERB) .....	55
2.6.5 – Estação celular (EC) .....	56
2.6.6 – Unidade repetidora (UR) .....	56
2.7 – Técnicas de acesso ao meio .....	56
2.7.1 – FDMA .....	57
2.7.2 – TDMA .....	59
2.7.3 – CDMA .....	61
2.8 – Sinalização de controle .....	65
2.8.1 – Processamento de chamada originada pela EM .....	67
2.8.2 – Processamento de chamada terminada pela EM .....	69
2.8.3 – Processamento de chamada originada pela rede pública .....	70
2.8.4 – Processamento de chamada terminada pela rede pública .....	71
2.8.5 – Procedimento de <i>handoff</i> .....	72
2.8.6 – Procedimento de <i>roaming</i> .....	74

## Capítulo 3 – Esquemas de modulação e codificação do sinal

3.1 – Transmissão do sinal .....	76
3.2 – Esquemas de modulação analógica .....	77
3.2.1 – Amplitude modulada (AM) .....	79
3.2.2 – Modulação angular (PM / FM) .....	81

---

3.3 – Esquemas de modulação digital .....	83
3.3.1 – Modulação por chaveamento de amplitude (ASK) .....	83
3.3.2 – Modulação por chaveamento de freqüência (FSK) .....	84
3.3.3 – Modulação por chaveamento de fase (PSK) .....	84
3.3.4 – Modulação por chaveamento de fase diferencial (DPSK) .....	85
3.3.5 – Modulação por chaveamento de fase em quadratura (QPSK) .....	87
3.3.6 – Modulação por chaveamento de fase em quadratura diferencial (QDPSK) .....	88
3.3.7 – Modulação por amplitude em quadratura (QAM) .....	89
3.4 – Técnicas de codificação de voz .....	90
3.4.1 – Processamento digital do sinal de voz .....	91
3.4.2 – Modulação por codificação de pulso (PCM) .....	94
3.4.3 – Modulação diferencial por codificação de pulso (DPCM) .....	96
3.4.4 – Modulação delta .....	97
3.4.5 – Codificação por sub-banda (SBC) .....	97
3.4.6 – Codificação por transmissão adaptativa (ATC) .....	99
3.5 – Vocoders .....	99
3.5.1 – Vocoder por predição linear (LPC) .....	100
3.5.2 – Vocoder por multi-pulso (MPE / LPC) .....	100
3.5.3 – Vocoder por excitação de código (CELP) .....	101
3.5.4 – Vocoder por excitação residual (RELP) .....	101
3.6 – Cyclic redundancy check (CRC) .....	102
3.7 – Interleaving .....	103

## Capítulo 4 – Aspectos de projeto do sistema

4.1 – Aspectos de projeto do sistema .....	106
4.1.1 – Volume de tráfego .....	107
4.1.2 – Área de serviço .....	109
4.1.3 – Primeira ERB .....	110
4.1.4 – Padrão de reuso .....	111

---

4.1.5 – Localização das ERBs .....	112
4.1.6 – Predição de cobertura .....	113
4.1.7 – Reavaliação do projeto .....	113
4.1.8 – Teste de campo .....	114
4.1.9 – Implantação do sistema .....	115
4.2 – Aspectos de propagação .....	116
4.3 – Interferências .....	118
4.4 – Aspectos de comutação .....	119
4.5 – Aspectos de tráfego .....	120

## Capítulo 5 – Engenharia de tráfego móvel

5.1 – Definições básicas .....	122
5.2 – Modelos de tráfego .....	125
5.2.1 – Modelo de origem de chamadas .....	126
5.2.2 – Modelo de duração de chamadas .....	128
5.3 – Engenharia de tráfego móvel .....	129
5.3.1 – Fórmula de Poisson .....	129
5.3.2 – Fórmula de Erlang-B .....	130
5.3.3 – Fórmula de Engset .....	131
5.4 – Dimensionamento do sistema .....	133
5.5 – Técnicas de expansão do sistema .....	136
5.5.1 – Degradação do grau de serviço .....	136
5.5.2 – Adição de novos canais .....	137
5.5.3 – Empréstimo de frequências .....	137
5.5.4 – Mudança do padrão celular .....	138
5.5.5 – <i>Cell-splitting</i> .....	139
5.5.6 – Celular <i>overlaid</i> e <i>underlaid</i> .....	140
5.5.7 – Setorização .....	140
5.6 – Eficiência do sistema .....	143
5.7 – Simulação de tráfego móvel celular .....	144

---

5.7.1 – Resultados .....	145
5.7.2 – Conclusões .....	149
5.8 – Anexos I: Tabelas de Erlang-B .....	150

## **Capítulo 6 – Teoria das antenas**

6.1 – Antenas .....	153
6.2 – Espectro eletromagnético .....	154
6.3 – Conceitos básicos .....	156
6.4 – Antenas omnidirecionais .....	162
6.5 – Antenas diretivas .....	164
6.6 – <i>Downtilt</i> .....	166
<b>Fonte de pesquisa</b> .....	167

---

## *Lista de Figuras*

---

### **Capítulo 1 – Introdução**

1.1 – Espectro definido pelo FCC .....	14
1.2 – Evolução dos sistemas celulares na Europa .....	17
1.3 – Evolução dos sistemas celulares nas Américas .....	18
1.4 – Evolução dos sistemas celular Japonês .....	18
1.5 – Acréscimo anual de assinantes por tecnologias .....	19
1.6 – Sistema móvel celular .....	24
1.7 – Usuários de móveis na América Latina .....	31

### **Capítulo 2 – Sistemas de comunicação móvel**

2.1 – Tecnologia WLL .....	33
2.2 – Sistema de rádio móvel convencional .....	34
2.3 – Conceito de células .....	35
2.4 – Conceito de reuso .....	36
2.5 – Conjunto de <i>clusters</i> .....	37
2.6 – Sobreposição celular .....	38
2.7 – Setorização celular .....	38
2.8 – Distância entre células no padrão hexagonal .....	40
2.9 – Espectro definido pelo FCC .....	43
2.10 – Arquiteturas de sistemas celulares .....	47
2.11 – Sistemas móvel celular .....	48
2.12 – Arquitetura centralizada .....	49
2.13 – Arquitetura descentralizada .....	50
2.14 – Estação rádio base .....	52
2.15 – Central de comutação e controle (CCC) .....	53

---

2.16 – Controlador de CCC .....	54
2.17 – Método FDMA .....	58
2.18 – Esquema SCPC .....	58
2.19 – Método TDMA .....	60
2.20 – Método CDMA .....	62
2.21 – Diagrama de comunicação CDMA .....	63
2.22 – Transmissão por espalhamento espectral .....	64
2.23 – Originação de chamada pela EM .....	69
2.24 – Término de chamada pela EM .....	70
2.25 – Originação de chamada pela Rede Pública .....	71
2.26 – Término de chamada pela Rede Pública .....	72
2.27 – Procedimento de <i>handoff</i> .....	74

### Capítulo 3 – Esquemas de modulação e codificação do sinal

3.1 – Esquemas analógicos de modulação do sinal .....	78
3.2 – O sinal no domínio do tempo (a) e da freqüência (b) .....	79
3.3 – Modulação AM do sinal de voz .....	80
3.4 – Modulação em freqüência do sinal dente-de-serra .....	82
3.5 – Modulação ASK .....	83
3.6 – Modulação FSk .....	84
3.7 – Modulação PSK .....	85
3.8 – Modulação DPSK .....	85
3.9 – Modulação QDPSK .....	88
3.10 – Modulação $\pi/4$ – DQPSK .....	89
3.11 – Recuperação do sinal amostrado.....	92
3.12 – Quantização e codificação das amostras de um sinal .....	92
3.13 – Características de umidade na transmissão digital .....	93
3.14 – Codificadores de voz .....	94
3.15 – Curvas de compressão – <i>Lei A</i> .....	95
3.16 – Codificação do canal .....	95

3.17 – Sistema digital baseado em PCM .....	96
3.18 – Predição linear – DPCM .....	96
3.19 – Modulação delta .....	97

## Capítulo 4 – Aspectos de projeto do sistema

4.1 – Levantamento local do volume e perfil do tráfego .....	108
4.2 – Definição da área de serviço do sistema .....	110
4.3 – Posicionamento da primeira ERB .....	111
4.4 – Localização das ERB .....	112
4.5 – Predição de cobertura .....	113
4.6 – Redefinição do projeto .....	114

## Capítulo 5 – Engenharia de tráfego móvel

5.1 – <i>Cell splitting</i> .....	139
5.2 – <i>Overlaid – underlaid</i> .....	140
5.3 – Setorização celular .....	143
5.4 – Fluxograma de processamento de tráfego .....	147
5.5 – Simulação para uma célula .....	148
5.6 – Simulação para um par de células .....	148
5.7 – Simulação para um conjunto de células .....	149

## Capítulo 6 – Teoria das antenas

6.1 – Antena log-periódica .....	154
6.2 – Diagrama de radiação tridimensional de um dipolo .....	159
6.3 – Diagrama de radiação da combinação de antenas .....	159
6.4 – Diagrama de radiação polar .....	160
6.5 – Cobertura por uma antena omnidirecional .....	163
6.6 – Cobertura por três antenas diretivas .....	165
6.7 – Cobertura por uma antena com <i>downtilt</i> .....	166



---

## *Lista de Quadros*

---

### **Capítulo 1 – Introdução**

1.1 – Cronologia dos sistemas de telefonia celular .....	15
1.2 – Conceitos envolvidos no sistema móvel celular .....	25

### **Capítulo 2 – Sistemas de comunicação móvel**

2.1 – Aspectos do padrão de reuso .....	42
2.2 – Canais de controle de 30 kHz cada .....	43
2.3 – Portadoras no espectro disponível .....	44
2.4 – Plano de frequências com padrão de reuso $N = 7$ .....	45

### **Capítulo 3 – Esquemas de modulação e codificação do sinal**

3.1 – Modulação DPSK-4 .....	86
3.2 – Modulação DPSK-8 .....	87
3.3 – Modulação QAM ( <i>Quadri-bit</i> ) .....	90
3.4 – Definição das sub-bandas – SBC .....	98
3.5 – Polinômios geradores de CRC .....	103

### **Capítulo 4 – Aspectos de projeto do sistema**

4.1 – Condições de propagação .....	117
-------------------------------------	-----

### **Capítulo 5 – Engenharia de tráfego móvel**

5.1 – Gerador de processo poissoniano .....	127
5.2 – Gerador de processo exponencial negativo .....	128
5.3 – Cálculo de GOS pela fórmula de Poisson .....	130
5.4 – Cálculo de GOS pela fórmula de Erlang-B .....	131

---

5.5 – Cálculo de GOS pela fórmula de Engset .....	132
---	-----

## **Capítulo 6 – Teoria das antenas**

6.1 – Faixas de frequências .....	155
-----------------------------------	-----

6.2 – Sub-faixas de SHF .....	156
-------------------------------	-----

---

## Capítulo 1 - Introdução

---

*Este capítulo tem por objetivo situar o leitor no ambiente das comunicações móveis. Apresentamos inicialmente um breve histórico das comunicações via rádio.*

---

### 1.1 - Breve histórico

---

- Para falarmos das Telecomunicações Celulares devemos nos reportar ao início com a transmissão de voz através de sinais elétricos experimentada por Alexander Graham Bell em 1876.
- Em meados de 1880 Heinrich Hertz evidenciou a propagação de ondas eletromagnéticas teoricamente sugerida por Maxwell. Isto levou o italiano [Gugliermo Marconi](#) a encontrar a primeira aplicação para a comunicação entre pontos não fixos. Em 1897, Marconi fez várias transmissões de rádio de Needles, na ilha de Wight, para um navio a 18 milhas da costa. Podemos dizer portanto, que a primeira aplicação importante das comunicações móveis foi a utilização em navegação até mesmo para a segurança dos navios.
- Reginald Fessenden realizou experimentos de transmissão em Amplitude Modulada (AM) de voz e música em 1905, mas somente em 1920 surgiu a primeira estação comercial de rádio em Pittsburg (EUA). Mesmo assim o uso do sistemas de radiodifusão durante a 1ª Guerra Mundial ainda foi limitado.
- Motivados mais pela curiosidade, em 1921 o Departamento de Polícia de Detroit fez o primeiro uso regular de sistema de rádio móvel em viaturas, primeiramente somente enviando ordens da Central de Polícia para as mesmas. Posteriormente, as estações móveis também podiam enviar mensagens. Esse sistema operava na faixa de 2MHz e sua operação era *Simplex Push-to-talk*. Em 1932 era a vez do Departamento de Polícia Civil de Nova Iorque usar o

sistema. Eram apenas 11 canais de voz compartilhados por até 5.000 veículos.

- Com o avanço tecnológico, a tendência era a de elevar as frequências de operação. Em 1935, a *Federal Communication Commission* (FCC), órgão regular do setor nos EUA, autorizou a utilização de quatro canais na faixa de 30MHz a 40MHz, em bases experimentais, regulamentando seu uso em 1938.
- A regulamentação do espectro destinado às comunicações móveis impulsionou o desenvolvimento de um sistema de grande porte nos Estados Unidos e que em 1946 a AT&T colocou em funcionamento. Esse sistema, iniciado em 1945 com um programa experimental a 150MHz, possuía seis canais espaçados de 60kHz e foi implantado em St. Louis (EUA). Este sistema também foi implantado em Green Bay (EUA), na mesma época. O sistema operava com poucos canais na faixa de 35MHz. Deve-se ressaltar que, mesmo com os canais espaçados de 60kHz, os mesmos eram susceptíveis a interferências de canais adjacentes entre usuários da mesma área. Este serviço era conhecido como Rádio Urbano, atingia um raio de 80 km e apresentava custos baixos aos assinantes (15 *cents*/minuto).
- Com novas descobertas a respeito da utilização de baixas frequências em sistemas de comunicação móvel inaugura-se um sistema de telefonia móvel ao longo da rodovia Nova Iorque – Boston em 1947. Esse sistema operava na faixa de 35 – 44MHz por acreditar que essa faixa possui um alcance maior e contornava melhor obstáculos de relevo, o que é verdade. Porém, o que veio a tona foi que essas frequências se propagam a longas distâncias via reflexão na ionosfera, fazendo com que as conversações pudessem ser ouvidas a quilômetros de distância causando interferências em outros sistemas.
- Deve-se ressaltar que a operação nos sistemas acima descritos ainda era *Simplex Push-to-talk* com as chamadas realizadas via telefonista e ainda com

---

a necessidade de o usuário procurar manualmente um canal vago antes de solicitar uma chamada. Com o aumento da demanda, houve uma insuficiência de canais disponíveis tornando as listas de espera de usuários enormes.

- Em 1950 o Departamento de Polícia da Filadélfia implanta o primeiro sistema *Full-duplex*, e a técnica de Multiplexação por Divisão de Tempo (TDM) é utilizada em sistemas fixos.
- Já em 1955, implementou-se a seleção automática de canais vagos pelos equipamentos de rádios móveis, surgiram de novas técnicas de projeto e fabricação de filtros que diminuíram o espaçamento de canais, houve um aperfeiçoamento dos sistemas acarretando um melhor desempenho dos mesmos etambém o uso de freqüências cada vez mais elevadas. Nessa época, a Suécia já era pioneira na telefonia móvel automática, interligando o sistema de rádio móvel a uma central de comutação automática através de um computador.
- O surgimento de sistemas chamados *Trunked* em 1960 marcou e definiu a base dos sistemas hoje existentes. Citamos o sistema MJ, criado em 1964, operando em 150MHz já com seleção automática de canal vago, e o sistema MK, já operando em 450MHz, também denominados MTS – *Mobile Telephone Service*, posto em operação em 1969. Esses sistemas tornaram-se o embrião do sistema IMTS (*Improved Mobile Telephone Service*) com faixa entre 150 e 450 MHz e canais de 30 kHz.
- Desde a sua criação, mesmo considerado um luxo, com contas médias de usuários na ordem de 10 a 20 vezes maior que a conta de um telefone comum, os sistemas de telefonia móvel eram citados como um mercado enorme, se os custos fossem mais acessíveis.
- A expansão de sistemas de telefonia móvel sempre bateu de frente com a limitação do espectro disponível. Pressões de mercado e das operadoras para

a expansão do sistema levaram o FCC, em 1968, a liberar uma faixa de 75MHz para o serviço de telefonia móvel, desde que fosse comprovado a viabilidade técnica de um sistema de grande capacidade. Isto só foi possível após negociações com emissoras de TVs que perderiam alguns canais de UHF. Comprovada a viabilidade técnica em 1974, o FCC regulamentou uma faixa entre 800 e 900 MHz de 40 MHz, em 1975, e depois ampliou esta faixa para a faixa entre 824 a 894 MHz, ainda utilizada por alguns sistemas [1].

	<i>Espectro</i>	<i>Expandido</i>			
824	825	835	845	846.5	849
A'	A	B		A'	B'
869	870	880	890	891.5	894
<i>33 canais</i>	<i>333 canais</i>	<i>333 canais</i>		<i>50 canais</i>	<i>83 canais</i>

**Figura 1.1 - Espectro definido pelo FCC**

- Em 13 de Outubro de 1983, a AT&T disponibilizou para Chicago o primeiro sistema de telefonia celular nos EUA, com o nome de *Advanced Mobile Phone Service* (AMPS). Mas o Japão já dispunha de um sistema similar na cidade de Tóquio desde 1979. A Europa apresentou outras soluções como o *Nordic Mobile Telecommunications* (NMT) dos países nórdicos, o *Total Access Communications System* (TACS), no Reino Unido, Itália, Áustria, Espanha e Irlanda e o C-450 na Alemanha e Portugal. Apresentamos uma cronologia destes sistemas no quadro abaixo.

Ano	Sistema / Padrão	País
1978 (1984)	AURORA 400 (800)	Canadá
1979	NTT 800	Japão
1981 (1986)	NMT 450 (900)	Escandinávia
1983	AMPS	EUA
1985	TACS	Reino Unido
1987	GSM	Europa
1989	TDMA (IS-54 / IS-136)	EUA
1993	CDMA (IS-95)	EUA

**Quadro 1.1 - Cronologia dos sistemas de telefonia celular**

- Na América Latina, o sistema móvel celular só teve início em 1989, adotando o sistema AMPS, que utilizava 666 frequências entre 800 e 900MHz. Em seguida vieram Uruguai, México, Bolívia, Trinidad, Guatemala, Venezuela, República Dominicana e o Brasil. No Brasil, a telefonia móvel celular foi implantada inicialmente na cidade do Rio de Janeiro, utilizando o sistema AMPS; em seguida, em Brasília, Campo Grande, Belo Horizonte e Goiânia.
- A tendência mundial de exploração destes serviços é a da universalização baseada na livre concorrência significando um incentivo a modernidade, com grandes investimentos por parte das concessionárias a fim de conquistar um maior *share*<sup>1</sup> de mercado.
- A mobilidade é fator diferenciador para o usuário que buscará serviços que poderá acessar onde quer que ele esteja no planeta. Isto é possibilitado pelo sistemas de *roaming*<sup>2</sup> automático, integrando sistemas e territórios automaticamente.

<sup>1</sup> *Share* – parte, porção ou quota; ação ou fração; vt. – ter em comum, usar junto, gozar em comum, compartilhar; compartilhar ou possuir alguma coisa junto com outras pessoas.

<sup>2</sup> *Roaming* -

- Uma tendência mundial é que os investimentos em redes de telefonia fixa sejam desviados para os sistemas com tecnologia *Wireless Local Loop* (WLL), onde a comunicação entre a central e o usuário do sistema é feita via rádio em sistema celular.
- Diversos conglomerados empresariais exploram as telecomunicações mundialmente. Estas empresas dão a devida importância à interconexão de suas redes celulares, de modo que os usuários dos serviços das diversas empresas possam comunicar-se entre si com a devida transparência, garantindo preços justos.

---

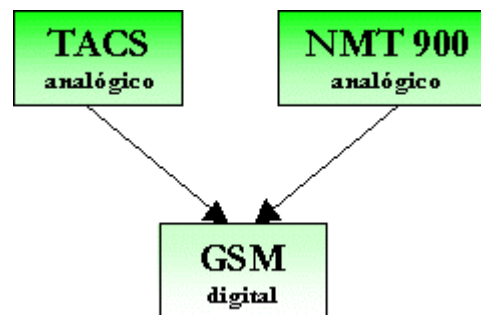
## 1.2 - Evolução tecnológica dos sistemas

---

- Os sistemas de comunicação móvel celular pioneiros da década de 30 pecaram por seus equipamentos volumosos, pesados, caros e de grande consumo. Utilizava-se a válvula de lógica. Os transmissores operavam com potência alta para cobrir a maior área de serviço possível, com a utilização ineficiente do espectro de frequência e transmissão apenas *one-way*.
- Em meados de 1950 surgiram os primeiros equipamentos transportáveis pelo homem, mas sua utilização ainda limitava-se às aplicações militares. Em 1957, com o surgimento dos transistores houve uma grande redução do volume dos aparelhos, em até 50% de seu volume. Isto representou redução de custo e menor consumo de potência. Os rádio portáteis já eram utilizados em 1960 com o advento dos circuitos integrados. E os telefones sem fio e telefones celulares portáteis surgiram com a tecnologia VLSI de integração de circuito em larga escala em 1970.



- O *boom*<sup>3</sup> dos sistemas de comunicação móveis celulares deu-se com o avanço tecnológico da década de 80 proporcionado pelas centrais CPA, técnicas de sinalização por canal comum e os enlaces digitais, via rádio ou cabo ótico. Isto tornou os sistema móvel celular mais baratos ao usuário.
- Nos últimos anos, os sistemas móvel celular se popularizaram mundialmente. A tecnologia celular está evoluindo de analógica para digital, objetivando a eficiência do espectro, qualidade de voz e integração de serviços.
- Durante a implantação dos primeiros sistemas de comunicação móvel celular, a tecnologia ficou dependente das características do mercado-alvo. Essa tendência de pesquisa mercadológico dirigiu a evolução e convergência dos sistemas em todo o mundo.
- Na Europa, os sistemas celulares analógicos TACS o NMT 900 convergiram para o *Global System for Mobile Communications* (GSM) [2].



**Figura 1.2 - Evolução dos sistemas celulares na Europa**

- Nos Estados Unidos, o sistema analógico AMPS, implantado também nas Américas e Austrália, evoluiu para o *Narrowband AMPS* (NAMPS) e depois para os padrões digitais *Time Division Multiple Access* (TDMA) e *Code Division Multiple Access* (CDMA) [3].

<sup>3</sup> *Boom* – estrondo, incremento rápido (de atividade, de negócios), crescimento súbito.

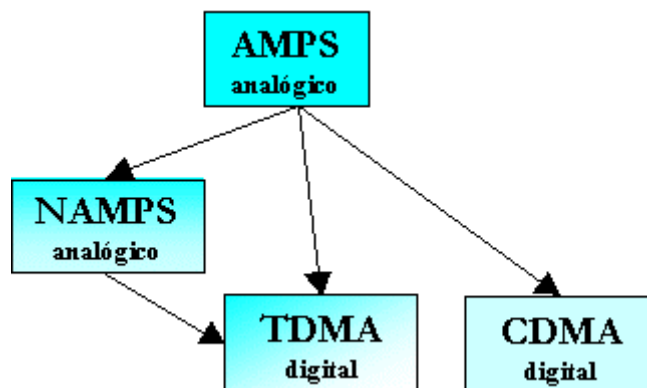


Figura 1.3 - Evolução dos sistemas celulares nas Américas

- O Japão desenvolveu seu padrão analógico NTT 800 evoluindo depois para o padrão digital *Personal*

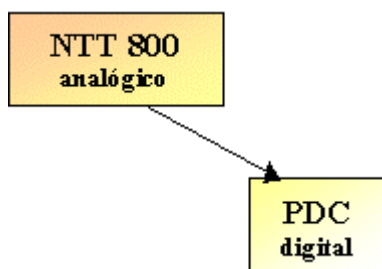
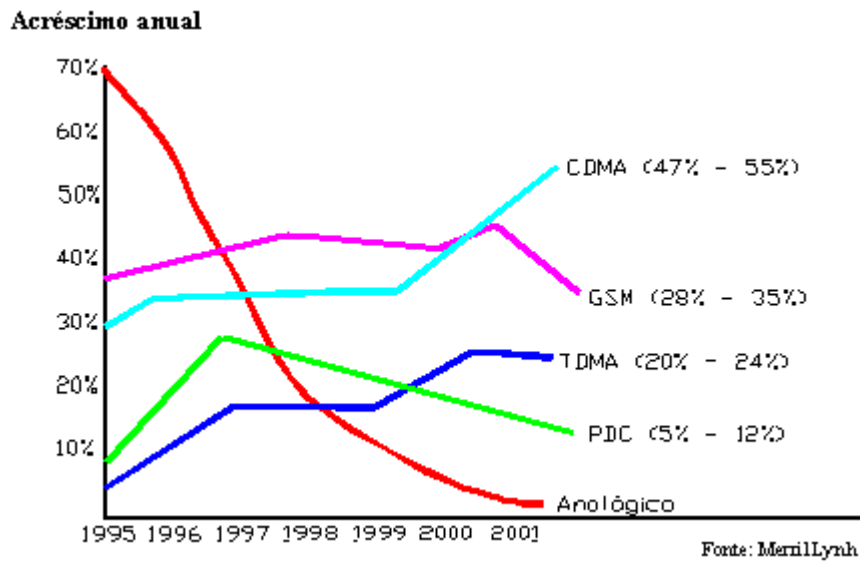


Figura 1.4 - Evolução do sistema celular Japonês

- A expectativa tecnológica do mercado de serviços móvel celular é a supremacia do padrão CDMA sobre as outras soluções analógicas e digitais devido a utilização mais eficiente do espectro, qualidade de transmissão e adaptabilidade aos diversos serviços existentes.



**Figura 1.5 - Acréscimo anual de assinantes por tecnologia**

### 1.3 - Evolução dos esquemas de modulação

*Apresentamos a seguir aspectos evolutivos dos esquemas de modulação da informação a ser transmitida em função das tecnologia e tendências mercadológicas.*

#### 1.3.1 - Sistemas analógicos

- Assim como qualquer sistema usando voz transmitida por rádio, o sistema de rádio móvel iniciou usando Modulação em Amplitude (AM) com largura de faixa do canal de 6kHz, inicialmente em banda HF e, posteriormente, em banda VHF.
- Logo após a invenção da Modulação em Freqüência (FM), apresentada por Edwin Armstrong em 1935, a mesma foi utilizada em serviços de rádio móvel com largura de faixa do canal de 120 kHz. Em 1940, apenas os serviços militares e alguns equipamentos comerciais operavam em VHF utilizando o FM.

- 
- Apesar da modulação FM ser notavelmente melhor que a AM, no que diz respeito à qualidade do sinal recebido além de outros predicados, utilizava uma faixa de frequência do canal (120 kHz) bem maior que a modulação AM (6kHz). Após 1940, os avanços tecnológicos permitiram uma melhor sensibilidade nos receptores e o desenvolvimento de filtros diminuíram essa faixa de frequência de 120 kHz para 60 kHz (1950), 30kHz (1960), 25 kHz (1970) e finalmente 12kHz (1980).

---

### 1.3.2 - Sistemas digitais

---

- Por incrível que pareça as técnicas digitais surgiram antes das técnicas analógicas, mas só se tornaram realizáveis a partir do advento dos transistores e, posteriormente, com a produção comercial dos circuitos integrados em 1961.
  - Com o *boom* dos serviços surgiu a necessidade de aliviar os problemas de capacidade do sistema (tráfego). Quatro soluções poderiam ser dadas:
    - Liberar mais espectro de frequência, o que comprometeria outros serviços de radio já existentes;
    - Subdividir as células existentes em células menores com a instalação de novas estações rádio base, o que encareceria o sistema;
    - Estreitamento da banda passante do canal de voz aumentando o número de canais de voz possíveis no espectro disponível;
    - Desenvolvimento da tecnologia mais eficiente no uso da largura de banda disponível.
- As duas últimas foram as opções escolhidas pela indústria.

- O padrão de Modulação por Codificação de Pulso (PCM) transmitindo 64kbit/s, usado para comunicação de voz em redes de telefones fixos, se transmitido por rádio, ocuparia aproximadamente 100kHz do espectro FM. Esforços concentrados diminuiriam a taxa de transmissão para 16kbps, como utilizado no padrão GSM, e até 8kbps como o sistema digital americano.
- As técnicas digitais se mostram mais robustas contra interferências e possuem uma maior flexibilidade para oferecer mais serviços ao usuário como transmitir voz e dados, por exemplo. Outra vantagem do sistema digital é a possibilidade de se utilizar técnicas de múltiplo acesso tais como o TDMA e o CDMA.

---

## 1.4 - Evolução dos métodos de acesso

---

*Descrevemos a seguir a evolução dos métodos de acesso e aspectos operacionais dos sistemas de comunicações via rádio móvel.*

---

### 1.4.1 - Simplex

---

- Inicialmente temos o *Symplex System* (SS), como um sistema que utilizava apenas uma frequência, e somente a estação base era capaz de transmitir dados para as estações móveis, ou seja, as estações móveis eram simples receptores. Como exemplo desse sistema temos o sistema adotado pela polícia de Detroit em 1921, utilizando somente uma portadora. Um exemplo ainda em operação são os serviços de radiodifusão.

---

### 1.4.2 - Half Duplex

---

- Após esse sistema pode-se citar o *Single Half-Duplex System* (SHDS) o qual ainda utilizava uma frequência, porém tanto a unidade móvel quanto a estação base eram capazes de transmitir e receber mensagens. Este sistema operava na base do *push-to-talk*, onde a estação base competia com a unidade móvel pelo canal de frequência. Como exemplo de utilização desse sistema temos o sistema de telefonia móvel da rodovia Nova Iorque – Boston, implantado em 1947, onde as chamadas eram realizadas com a ajuda de uma telefonista. O serviço de Radioamador ainda opera neste sistema.

---

### 1.4.3 - Double Half Duplex

---

- No sistema *Double Half-Duplex System* (DHDS), a estação base é capaz de transmitir e receber mensagens simultaneamente, ficando a unidade móvel ainda utilizando o sistema *push-to-talk*. Para melhor assimilação, pode-se citar o exemplo dos rádio-taxi que utilizam este sistema.

---

### 1.4.4 - Duplex

---

- Tanto a estação base quanto a unidade móvel operam com sistema *Full Duplex* (DS). É utilizado para transmitir sinais de forma independente, enviando-o em uma frequência e recebendo em outra diferente. Aqui enquadra-se os sistemas de telefonia celular.

---

## 1.5 - Serviços de comunicação móvel celular

---

Descrevemos a seguir alguns sistemas de comunicação móvel desenvolvidos para atender mercados específicos através de serviços diferentes.

---

### 1.5.1 - Serviço móvel especializado – *Trunking*

---

- O *Mobile Telephone System* (MTS) surgiu como primeiro conceito de telefonia móvel utilizando o *Full Duplex*. O MTS pode ser dividido em duas categorias chamadas *Nontrunked Mobile System* (NTMS) e *Trunked Mobile System* (TMS). O NTMS possui poucos canais alocados a serviços especiais, tendo os usuários divididos em grupos acessando apenas um canal cada. Há a necessidade de uma telefonista para comutar as chamadas, e ainda utiliza-se o *push-to-talk*. Alguns exemplos deste serviços são o radioamador, o rádio-taxi, etc..
- O TMS dispõe de vários canais que podem ser acessados por diversos usuários, inicialmente através de seleção manual. Um dos desafios iniciais do TMS foi alcançar sua máxima eficiência sem exigir que cada equipamento móvel a capacidade de sintonizar todos os canais em serviço. A construção de sintetizadores de frequências, que podem sintonizar um grande número de frequência utilizando poucos cristais de quartzo, solucionou esse problema surgindo a seleção automática de canais. Estes sistemas utilizam o *push-to-talk* em *Half Duplex* ou *Full Duplex* e são conhecidos por Serviço Móvel Especializado (*Trunking*).

### 1.5.2 - Sistema móvel celular – SMC

- Neste sistema provedor do serviço de telefonia celular, a área de serviço é dividida em regiões (*Clusters*<sup>4</sup>) que utilizam todo o espectro de freqüências disponível. Estes, por sua vez, são subdivididos em regiões menores (células) que utilizam um subgrupo do espectro de freqüências. Nesse sistema, os canais utilizados em uma célula podem ser reutilizados em outras desde que as mesmas pertençam a *clusters* diferentes e sejam suficientemente afastadas para minimizar as interferências. Com isso, atacamos a grande restrição do sistema de comunicações móveis que é o pequeno espectro de freqüências destinado ao sistema, atendendo mais assinantes na mesma, ou seja, um maior tráfego oferecido.

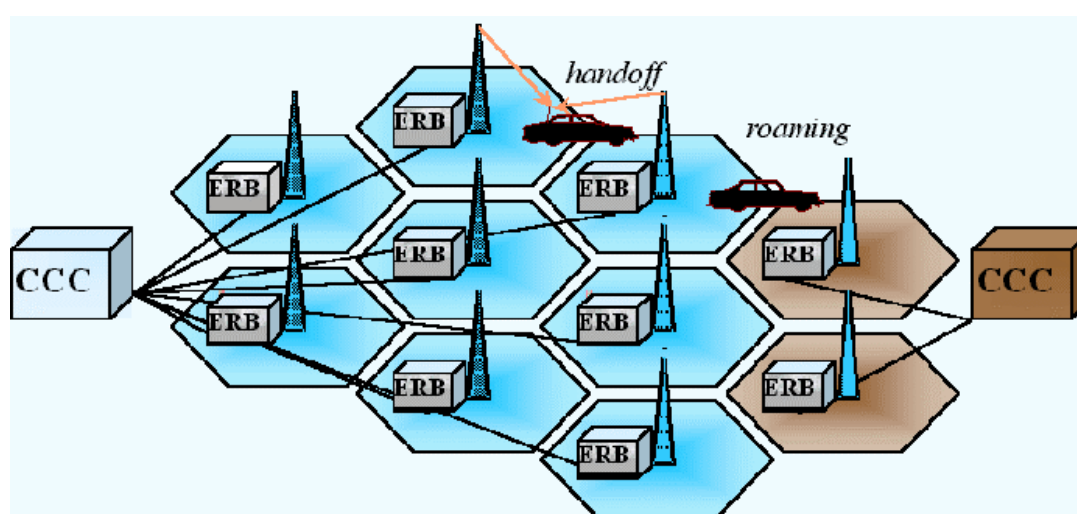


Figura 1.6 - Sistema móvel celular

<sup>4</sup> *Cluster* - cacho, ramalhete; enxame, bando, cardume;. multidão, quantidade, agrupamento. // vt+vi - crescer em cachos, produzir cachos ou ramalhetes; aglomerar-se, agrupar-se, apinhar(-se).



Célula	Área na qual o sinal de uma ERB é adequadamente recebido
<i>Cluster</i>	Conjunto de células que ocupam todo o espectro do sistema
ERB	Estação de Rádio Base
EM	Estação Móvel
CCC	Central de Controle e Comutação
RTPC	Rede Telefônica Pública Comutada
Área de Controle	Área sob supervisão de uma CCC
Área de Serviço	Toa a área onde a EM tem acesso ao serviço da rádio móvel
Área de Localização	Área na qual a EM pode mover-se sem de atualização do registro
Procedimento de " <i>Handoff</i> "	Comutação de uma chamada em andamento de uma ERB para outra quando a estação móvel cruza a fronteira entre as células
Assinante Visitante " <i>Roamer</i> "	Assinante que acessa o sistema fora de sua Área de Localização e necessita da atualização de seu registro de localização

**Quadro 1.2 - Conceitos envolvido no Sistema Móvel Celular**

### 1.5.3 - Serviços especial de radiochamada – *Paging*

- Os serviços de *paging* consiste no mais simples serviço de comunicação móvel disponível onde é estabelecida apenas comunicação *one-way simplex* entre a estação base e o usuário móvel. O primeiro sistema de *paging* comercial foi o conhecido *beep* onde a estação base envia uma mensagem ao aparelho do usuário que emite um alerta sonoro. O usuário tem então, que utilizar um telefone para se comunicar com a estação base e receber a mensagem.
- Atualmente sistemas mais avançados transmitem mensagens alfanuméricas e até sinais de voz operando em canais de faixa de 12,5 ou 25 kHz de acordo com a padronização de codificação e sinalização definida pelo *International Radio Consultative Committee* (CCIR). Alguns protocolos como o *2-tone*, *5/6-*

---

*tone*, POCSAG e FLEX foram padronizados e são globalmente utilizados. Já existem mais de 51 milhões de usuários deste sistema no mundo.

---

#### 1.5.4 - Redes de dados sem fio - WLAN

---

- O conceito de Rede de dados sem fio representa uma extensão da técnica de comutação de pacotes via rádio, que atende grandes áreas geográficas, com baixa taxa de transmissão quando comparada com a fibra ótica, e não necessita de linha de visada. A rede é composta de transmissor, receptor, antena e controlador/processador. Esse serviço ainda oferece uma conectividade dinâmica devido a mobilidade e uma topologia dinâmica pela nomadicidade. Destacamos os seguintes sistemas de dados sem fio [4]:
  - ARDIS – opera nos EUA à taxa de 19,2 kbps na faixa de 800 – 900MHz;
  - MOBITEX – rede internacional à taxa de 8 kbps na faixa de 800 – 900MHz;
  - TETRA – adotado na Europa à taxa de 36 kbps na faixa de 380 – 393MHz;
  - CDPD – utiliza o padrão de telefonia celular AMPS com taxas de 19,2 kbps;
  - GPRS – utiliza o sistema de telefonia celular GSM com taxa variável de bits.

---

### 1.5.5 - Telefone sem fio – *Cordless Telephone*

---

- O *Cordless Telephone* (CT) é, em linhas gerais, a evolução do telefone sem fio. Esta evolução pode ser descrita por três gerações distintas apresentadas a abaixo.
- O CT-1 representa a geração de aparelhos com tecnologia analógica atendidos dentro de uma área de serviço de 50 a 200 m de raio. Estes sistemas trabalhavam com um único canal de comunicação fixo e, sendo assim, não garantiam a privacidade das conversações. Diversos sistemas surgiram trabalhando em frequências diferentes como 50 MHz nos EUA, 300 MHz no Japão e 900 MHz na Europa.
- A geração CT-2 pertencia a era digital e já apresentava a seleção automática de canais, o que constituía em maior privacidade. Estes serviços englobam PABX sem-fio, Telepoint, etc..
- A terceira geração, CT-3, foi apresentada com o *Digital European Cordless Telephone* (DECT), que utiliza a técnica TDMA com reuso de frequências, se aproximando em muito de um serviço celular. Desenvolvido para operar na Europa, tem uma banda de 20MHz, 12 canais por célula e um total de 12 canais por portadora.

---

### 1.5.6 - *Universal mobile telecommunication services - UMTS*

---

- O *Universal Mobile Telecommunication Services* (UMTS) é uma sugestão de convergência de serviços de comunicação móvel tendo como base o sistemas de telefonia móvel celular GSM. Seu objetivo é padronizar serviços de telecomunicações a nível mundial com a mesma qualidade dos serviços fixos.

---

### 1.5.7 - *Future public land mobile telecommunications systems - FPLMTS*

---

- O *Future Public Land Mobile Telecommunications Systems* (FPLMTS) é mais uma sugestão de convergência de serviços de comunicação móvel patrocinado pelo CCIR, onde a tecnologia móvel celular também é utilizada para prover os serviços fixos. Esse serviço é direcionado para países em desenvolvimento, onde há uma maior procura por serviços de telecomunicações rurais ou em áreas remotas ou quando a capacidade de oferecer um bom serviço em áreas urbanas já é crítica.

---

### 1.5.8 - *Personal communication networks - PCN*

---

- O conceito de *Personal Communications Networks* (PCN) se baseia nos princípios "*Go-any-where, Talk-any-time*", sendo um conceito de serviço e não de sistema, voltado para o mercado de massa oferecendo um serviço de baixo custo e alta qualidade que opera em 1,8GHz.
- Em [5], Michel Yacoub sugere uma "luta de gigantes" pela padronização dos métodos de acesso utilizados no PCS, entre GSM e CDMA.
- Deste conceito surgiu, e o FCC adotou, a terminologia *Personal Communication Services* (PCS) sugerindo o princípio de "*different things to different people*". Em [6], David Goodman sugere o entendimento do "S" de PCS como: *Spectrum, Systems, Sets, Subscribers, Standards e Services*.

---

### 1.5.9 - Mobile satellite systems - MSS

---

- A utilização da comunicação via satélite como opção para as comunicações móveis poderá oferecer ao usuário um serviço mundial. Satélites geossíncronos a 35.800 km de altitude, portanto satélites de baixa órbita (LEOS), serão utilizados para prover este serviço. Técnicas de comutação no espaço possibilitarão atrasos menores na transmissão garantindo a qualidade dos serviços [7].

---

### 1.6 - International Telecommunication Union - ITU

---

- O *International Telecommunication Union* (ITU) foi fundado em 1932 vinculado às Nações Unidas (ONU) com os objetivos de harmonizar a utilização do espectro de rádio frequência e padronizar a oferta de serviços telefônicos no mundo. O ITU é coordenado por um Conselho Administrativo, apoiado por uma Secretaria Geral e subdividido em três Comitês:
  - IFRB - *International Frequency Registration Board*
  - CCIR - *International Radio Consultative Committee*
  - CCITT - *International Telegraph and Telephone Consultative Comitee*
- O ITU divide o mundo em três regiões para coordenação de suas atividades:
  - Região 1: Europa, Antiga URSS, Ásia Menor e África
  - Região 2: Américas e Hawai
  - Região 3: Oceania e o restante da Ásia

---

## 1.7 - ANATEL - Agencia Nacional de Telecomunicações

---

- A Lei Geral das Telecomunicações Brasileiras aprovada em votação na Câmara dos Deputados em 18/06/97, no Senado Federal em 10/07/97 e sancionada no dia 16 de julho de 1997 pelo Presidente da República determina a criação da Agencia Nacional de Telecomunicações – ANATEL.
- A ANATEL é então criada como autarquia especial, administrativamente independente, financeiramente autônoma e não se subordina hierarquicamente a nenhum órgão de governo. Nestes termos suas decisões só podem ser contestadas judicialmente. Assim, a Agência possui poderes de outorga, regulamentação e fiscalização. A autonomia financeira da agência é assegurada pelos recursos do Fundo de Fiscalização das Telecomunicações (FISTEL).
- A ANATEL deve implementar a política nacional de telecomunicações; propor a instituição ou eliminação da prestação de modalidade de serviços no regime público; propor o Plano Geral de Outorgas; propor o Plano Geral de Metas para universalização dos serviços de telecomunicações, administrar o espectro de radiofrequências e o uso de órbitas; compor administrativamente conflitos de interesses entre prestadoras de serviços de telecomunicações; atuar na defesa e proteção dos direitos dos usuários; atuar no controle, prevenção e repressão das infrações de ordem econômica; estabelecer restrições, limites ou condições a grupos empresariais para obtenção e transferência de concessões, permissões e autorizações, de forma a garantir a competição e impedir a concentração econômica no mercado; estabelecer a estrutura tarifária de cada modalidade de serviço; dentre outras atribuições.
- No Brasil a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) é o órgão regulador e fiscalizador de todos os sistemas de comunicação no Brasil. A ANATEL foi criada pela Lei Geral das Telecomunicações de julho de 1997.

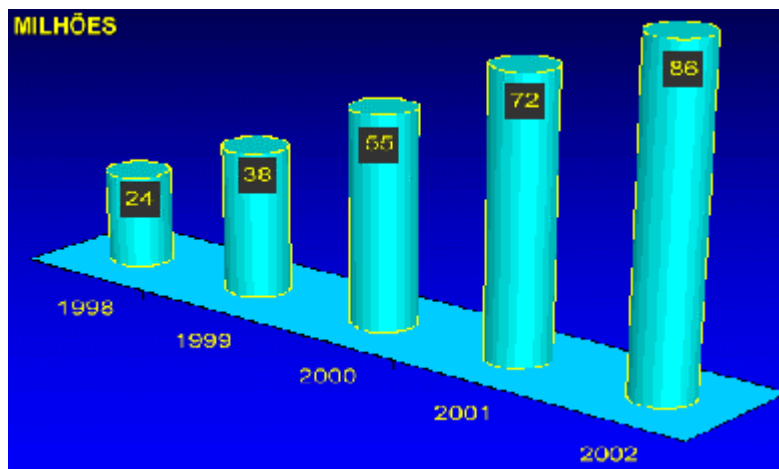


Figura 1.7 - Usuários de móveis na América Latina

---

## Capítulo 2 - Sistema de comunicação móvel

---

*Este Capítulo tem por objetivo apresentar ao leitor a arquitetura básica dos sistemas de comunicação móvel celular, sua estrutura e equipamentos. Daremos destaque também ao plano de frequências, aos métodos de acesso ao meio e a sinalização de controle.*

---

### 2.1 - Evolução dos sistemas de comunicação móvel

---

- Os primeiros sistemas celulares a operarem tinham como principais características a transmissão da voz por modulação analógica FM e modulação digital FSK para sinalização. A técnica de acesso ao meio era puramente pela multiplexação por divisão de frequência (FDM), mais conhecida por FDMA. Dentre estes sistemas destacamos AMPS, RTMS, NMT, C-450, Radiocom 2000, NMT-450, NMT-900 e TACS; todos estes muito parecidos.
- Um segunda geração de sistemas móvel celular surgiu das técnicas digitais para codificação da voz e compressão. Estas técnicas permitiram a combinação da multiplexação por divisão de tempo (TDM) com o FDM, surgindo o sistema TDMA. Esta técnica consiste em dividir o tempo de um canal em *slots*<sup>5</sup> de tempo criando mais canais lógicos dentro do canal físico. Esta geração oferece alto desempenho, com capacidade superior em mais de três vezes aos primeiros sistemas celulares.
- A companhia Qualcomm desenvolveu uma nova técnica de acesso ao meio baseada na codificação de cada canal de voz a taxas elevadas por códigos específicos que geram sinais com baixa correlação. Esta técnica de espalha-

---

<sup>5</sup> *Slots* - ranhura, fenda; abertura para colocar moedas; janela: vaga em um esquema, programa ou horário. // vt - fazer ranhura ou fenda; entrar pela abertura; fazer entrar pela abertura; encaixar (num horário).



mento espectral foi herdada das forças armadas onde o sinal a ser transmitido é espalhado em uma faixa do espectro bastante larga, tornando as transmissões difíceis de interceptar.

- A Europa procurou convergir em suas pesquisas para o padrão GSM. Este sistema de arquitetura aberta permite a adoção de equipamentos de diferentes fabricantes, reduzindo os custos de implementação do sistema. Este é o padrão mais difundido no mundo.
- O Japão implantou em julho de 1995 a concepção do serviço *Personal Handy-Phone System* (PHS) com o objetivo de oferecer serviço semelhante ao serviço de telefone sem-fio convencional, restrito a área geográfica de uma cidade, e com custo bastante econômico. Para alcançar esta concepção de economia foi decidido que o PHS faria uso da rede telefônica já implantada ao invés de construir uma rede própria como aconteceu para os outros sistemas de telefonia móvel celular. Este conceito deu suporte as redes telefônicas de *Wireless Local Loop* (WLL) mostrada na FIG.a 2.1.

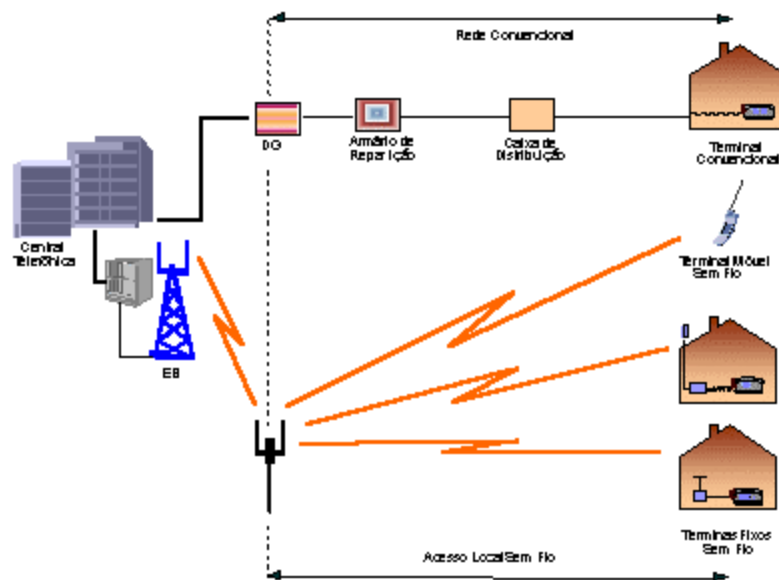


Figura 2.1 - Tecnologia WLL

## 2.2 - Sistema móvel celular

- O primeiros sistemas de comunicação por rádio móvel possuíam uma única estação base, com a antena em região elevada da cidade e alta potência de transmissão, cobrindo uma grande área contendo todo o espectro de frequências. Como a comunicação era restrita à área coberta por uma única antena, o tráfego oferecido era limitado ao espectro de frequências disponível, ou seja, ao número de canais disponíveis. Os sistemas deveriam estar geograficamente separados para evitar a interferência co-canal, mas isto gerava descontinuidade das chamadas em andamento sempre que o usuário necessitava de percorrer duas áreas de serviço distintas operando sua Estação Móvel (EM).

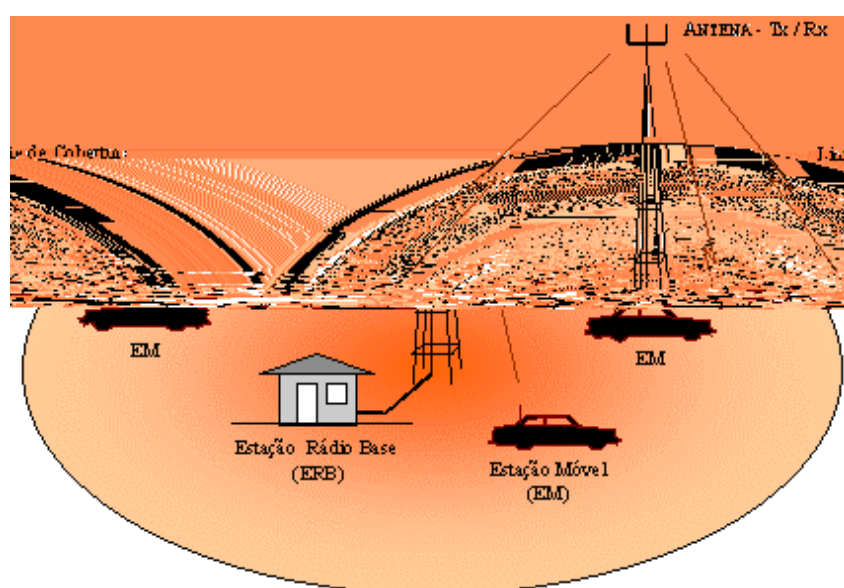


Figura 2.2 - Sistema de rádio móvel convencional

- Um sistema de comunicação móvel celular utiliza o reuso de um mesmo conjunto de canais para conseguir atender ao tráfego pelo uso de um grande número de Estações Rádio Base (ERB). Chama-se **célula** a região iluminada por uma ERB e atendida por um grupo de canais e **área celular** como aquela coberta pela potência mínima para comunicação adequada.

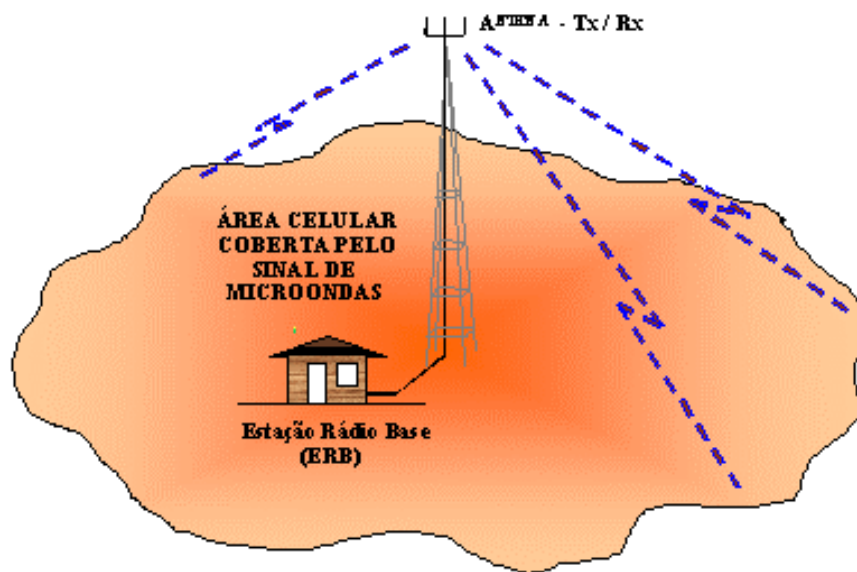


Figura 2.3 - Conceito de célula

- O reuso de frequência é feito dividindo-se todo o espectro disponível em grupos de frequências. Estes grupos são utilizados em células separadas entre si o suficiente para não haver interferência. As células que contêm o mesmo grupo de canais são denominadas co-células ou células co-canais.

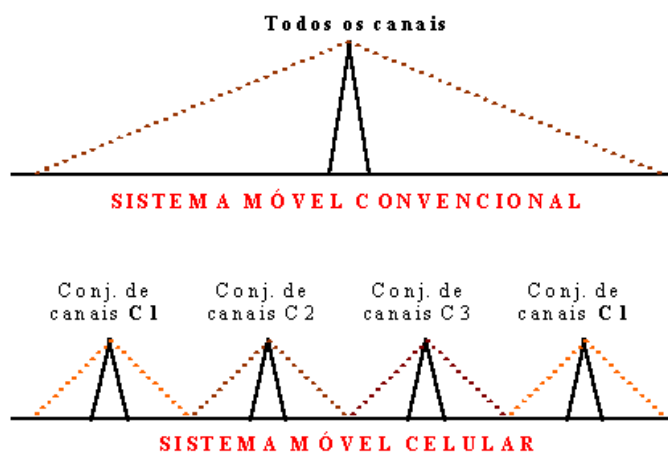
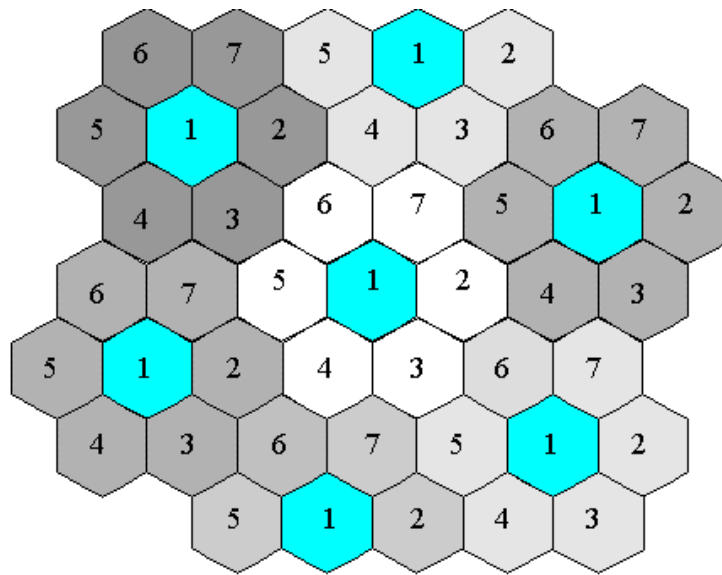


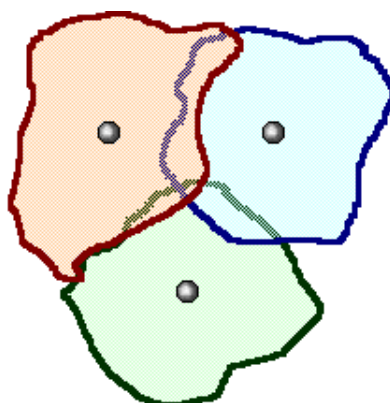
Figura 2.4 - Conceito de reuso

- Define-se **padrão de reuso** como o número de células adjacentes que reagrupam todo o espectro original, ou seja, o número de grupos de freqüências. Quanto menor o padrão de reuso, maior o número de canais por grupo, portanto mais canais por célula e maior a quantidade de tráfego oferecido por cada célula.
- Para que seja a reutilização de uma freqüência em outra área é necessário garantir que o sinal transmitido por uma ERB não interfira na área celular coberta por outra. Para isto a área de serviço é dividida em *clusters* contendo todo espectro disponível. Tendo em vista que um conjunto de canais ainda é dividido em dois sistemas A e B de operadoras diferentes, o que permite a utilização de 333 canais por sistema, sendo 312 de voz e 21 de controle, faz-se necessário a utilização otimizada do reuso de freqüências.



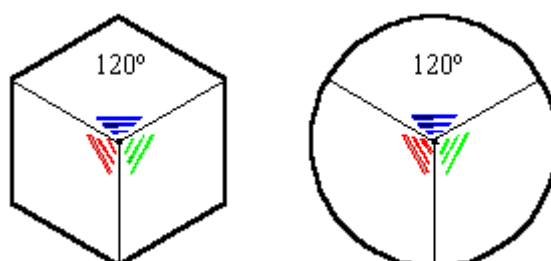
**Figura 2.5 - Conjunto de *clusters***

- O sistema celular permite cobrir toda a área utilizando transmissores de baixa potência e permitindo a continuidade das chamadas em curso através da técnica de *handoff*. O maior número de canais na mesma área oferece alta eficiência de tráfego com baixa Probabilidade de Bloqueio (GOS). Pode-se fazer uso da hierarquia celular com células de diferentes tamanhos atendendo o tráfego flutuante ao longo do dia.
- O padrão hexagonal é escolhido para a representação das células, mas sabemos que devido as condições de relevo do ambiente de propagação temos áreas celulares disformes, inclusive tendo seus contornos se sobrepondo como mostra a FIG. 2.6. A primeira vista isto pode parecer um inconveniente ao sistema. Na verdade, estamos diante de uma grande "oportunidade de negócio".



**Figura 2.6 - Sobreposição celular**

- Verifica-se nestas áreas de sobreposição uma maior oferta de tráfego, onde a EM pode ter comunicação adequada com mais de uma ERB. Técnicas de encaminhamento alternativo de tráfego fazem uso destas imperfeições, muitas das vezes até provocadas, para aumento do tráfego oferecido em regiões críticas. A setorização celular pode ser utilizada para projetar a morfologia da célula. Assim, além das células omnidirecionais, onde um mesmo grupo de frequências é irradiado uniformemente em toda a região em torno da antena, também podemos ter células setorizadas onde o grupo de frequências é subdividido em novos subgrupos através de antenas diretivas espaçadas de  $120^\circ$  ou  $60^\circ$ .



**Figura 2.7 - Setorização celular**

---

## 2.3 - O padrão de reuso

---

- O Padrão Celular (N) diz respeito ao número de células por *cluster*, o que também define o número de canais por célula. A vantagem de se utilizar o padrão hexagonal para representar o formato da célula permite que usemos as propriedades de simetria deste polígono para estudarmos o padrão celular.
- O reuso de frequências em um padrão hexagonal segue a três regras básicas:
  - cada célula possui 6 co-células equidistantes;
  - o de frequências deve ser isotrópico; e
  - um *cluster* deve ser formado por um conjunto contíguo de células.
- Tomemos um sistema de coordenadas onde os eixos formam um ângulo de 60° entre si com a unidade ao longo dos eixos igual a  $R$ , sendo  $R$  o raio maior de um hexágono. Seja a posição de uma célula é dada por um conjunto de coordenadas  $(u_n, v_m)$ . Então, por simetria, verificamos que a distância entre duas có-células nas posições  $(u_1, v_1)$  e  $(u_2, v_2)$ , ou seja, a distância de reuso  $D$  é dada por

$$D^2 = i^2 + i \cdot j + j^2 \quad [ 2.1 ]$$

onde  $i = u_1 - u_2$ ,  $j = v_1 - v_2$  e  $i, j \in \mathbb{N}$ . Isto define um conjunto de possíveis padrões de reuso com 1, 3, 4, 7, 9, 12, 13, ... células por *cluster*.

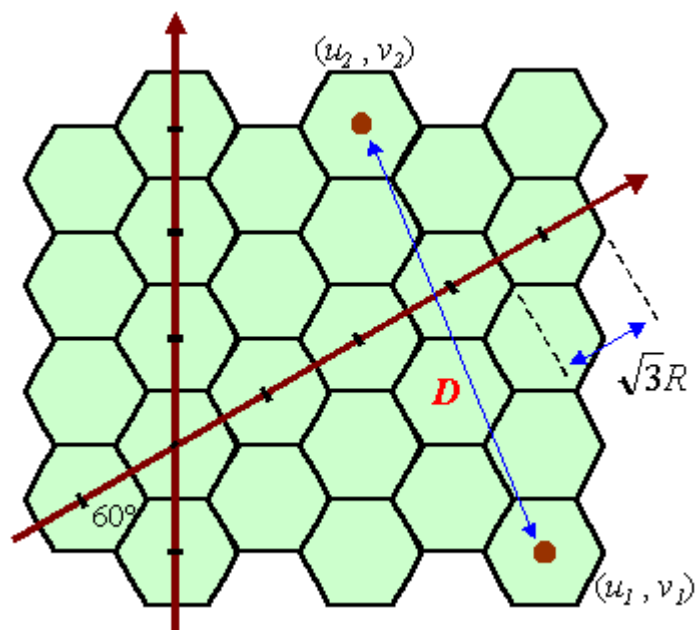


Figura 2.8 - Distância entre células no padrão hexagonal

- Sendo a área da célula hexagonal dada por

$$a = 3R^2 \sqrt{3} / 2 \quad [2.2]$$

- Mas como consideramos  $R$  como a unidade temos na verdade que

$$a = \sqrt{3} / 2 \quad [2.3]$$

- Sendo a área de um *cluster* de raio  $D$ , que é a mesma distância entre co-células, dada por

$$A = D^2 \sqrt{3} / 2 \quad [2.4]$$

- Podemos tomar o número de células por *cluster*, ou seja, o padrão de reuso  $N$ , apenas dividindo a área total do *cluster* pela área de uma célula. Assim temos



$$N = A/a = D^2 = i^2 + i.j + j^2 \quad [ 2.5 ]$$

- Neste caso podemos obter uma relação direta entre o fator de reuso  $N$  e a relação  $D/R$

$$D/R = \sqrt{3N} \quad [ 2.6 ]$$

- Fazendo uma análise superficial, podemos observar que a medida que aumentamos o fator de reuso  $N$ , ou seja, o número de células por *cluster*, estaremos diminuindo o número de canais por célula, diminuindo o tráfego oferecido por célula. Por outro lado, estaremos aumentando a relação  $D/R$  (*podemos entender que estamos aumentando a distância de reuso ou que estamos diminuindo o raio das células*). Isto implica na diminuição da interferência entre co-células, uma vez que a potência transmitida decresce com a distância  $d$  na forma  $d^{-\alpha}$ .
- Agora, considerando a diminuição do fator de reuso estaremos aumentando o tráfego nas células pelo maior número de canais. A contraposição se dá na diminuição da relação  $D/R$  implicando em menor qualidade do sinal recebido. O QUADRO 2.1 ilustra bem as relações do fator de reuso com o tráfego e a qualidade do sinal recebido devida à interferência co-canal.

<b>Padrão de Reuso (N)</b>	<b>Relação D/R</b>	<b>Canais por Célula</b>	<b>Tráfego por Célula</b>	<b>Qualidade na recepção</b>
<i>1</i>	<i>1.73</i>	<i>360</i>	<i>alto</i>	<i>baixa</i>
<i>3</i>	<i>3.00</i>	<i>120</i>		
<i>4</i>	<i>3.46</i>	<i>90</i>		
<i>7</i>	<i>4.58</i>	<i>51</i>		
<i>12</i>	<i>6.00</i>	<i>30</i>	 <i>baixo</i>	 <i>alta</i>

**Quadro 2.1 - Aspectos do padrão de reuso**

- Na verdade podemos utilizar células de outro formato que não o hexagonal. Para o planejamento de microcélulas em região urbana, por exemplo, padrões triangular, quadrado ou até em forma de diamante podem ser utilizados. Assim, dependendo do polígono escolhido formamos nova geometria do sistema, podendo ter padrões de reuso diferentes daqueles dados pela Equação 2.1.

---

## **2.4 - Plano de freqüências**

---

- Um projeto de comunicações via rádio baseia-se na transmissão e recepção de informações que modulam uma freqüência portadora. Utiliza-se um plano de freqüências para organizar essas freqüências portadoras. Neste plano as freqüências portadoras são distribuídas de acordo com o fim a que se destinam, seja a televisão, a telefonia, o rádio, etc..
- A faixa dos 800MHz, inicialmente designada a serviços de TV em UHF, foi escolhida pelo FCC para a utilização em serviços de comunicação móvel ce-

lular. Essa faixa não é a ideal, mas apesar das dificuldades encontradas, foi comprovada sua utilização. Foram definidos, 40MHz inicialmente, e depois 50 MHz como descrito na FIG. 2.9.

	<i>Espectro</i>	<i>Expandido</i>			
824	825	835	845	846.5	849
<b>A'</b>	<b>A</b>	<b>B</b>		<b>A'</b>	<b>B'</b>
869	870	880	890	891.5	894
<i>33 canais</i>	<i>333 canais</i>	<i>333 canais</i>		<i>50 canais</i>	<i>83 canais</i>

**Figura 2.9 - Espectro definido pelo FCC**

- Os primeiros sistemas utilizavam um espectro básico de 666 canais *duplex* dividido em duas bandas, A e B, para exploração do serviço por duas operadoras. Posteriormente foram acrescentados novos canais ao sistema que utiliza agora um espectro expandido com 832 canais *duplex*. São 832 canais de 30 kHz, de 824 MHz a 849 MHz, no sentido ERB para EM e mais 832 canais de 30 kHz, de 870 MHz a 890 MHz, no sentido EM para ERB formando os pares de portadora do sistemas *duplex*.
- A maior parte destes canais são canais dedicados à voz. Originariamente, 21 destes canais *duplex* são canais de controle do espectro básico (Canais *Set-Up*), com a função de transmitirem sinalização na forma digital.

<b>Canais de Controle ( 42 canais <i>Set-up</i>)</b>	
Banda A	313 a 333
Banda B	334 a 354

**Quadro 2.2 - Canais de controle de 30 kHz cada**

Espectro Expandido		
Transmitido pela ERB	$f = 0,03.N + 870$	$001 < N < 799$
Transmitido pela ERB	$f = 0,03.(N - 1023) + 870$	$990 < N < 1023$
Transmitido pela EM	$f = 0,03.N + 825$	$1 < N < 799$
Transmitido pela EM	$f = 0,03.(N - 1023) + 825$	$990 < N < 1023$

**Quadro 2.3 - Portadoras no espectro disponível**

- Como pode-se ver os recursos do espectro designados ao serviço celular são finitos, assim, o desafio é a utilização das freqüências da maneira mais eficiente possível. Podemos conseguir isto pelo aumento da quantidade de canais de voz, aprimoramento do reuso espacial das freqüências, designação de novos canais e pela, alocação dinâmica de canais para as chamadas. A forma escolhida para melhor utilização do espectro foi o reuso de freqüências que é, então, a espinha dorsal dos sistemas celulares.
- Durante a divisão das freqüências em grupos os canais por célula estes são divididos em canais de voz e canais de controle (*Set-up*). No QUADRO 2.4 podemos observar um exemplo de plano de freqüências onde é considerado o padrão de reuso  $N = 7$ . Assim, cada subgrupo de canais formados pelas colunas  $A_i + B_i + C_i$ , onde  $i \in [1,7]$ , forma o grupo de canais de uma célula. Observe que os canais de controle estão em fundo azul.

1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147
148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168
169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189
190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231
232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252
253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273
274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294
295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312			
313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333
																		667	668	669
670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690
691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711
712	713	714	715	716					997	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002
1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023

B  
A  
N  
D  
A  
A

1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C
334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354
355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375
376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396
397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417
418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438
439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459
460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480
481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501
502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522
523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543
544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564
565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585
586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606
607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627
628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648
649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669
								720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732
733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753
754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774
775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795
796	797	798	799																	

B  
A  
N  
D  
A  
B

Quadro 2.4 - Plano de freqüências com padrão de reuso  $N = 7$

- O método de reuso de freqüência é útil para aumentar a eficiência do uso do espectro, mas, como já vimos, resulta em interferências de co-canal, pois o mesmo canal de freqüência é usado repetidas vezes em diferentes células co-canal com certa proximidade entre si. Assim, o padrão de reuso vai depender da distância mínima entre células com mesma freqüência, ou seja, células

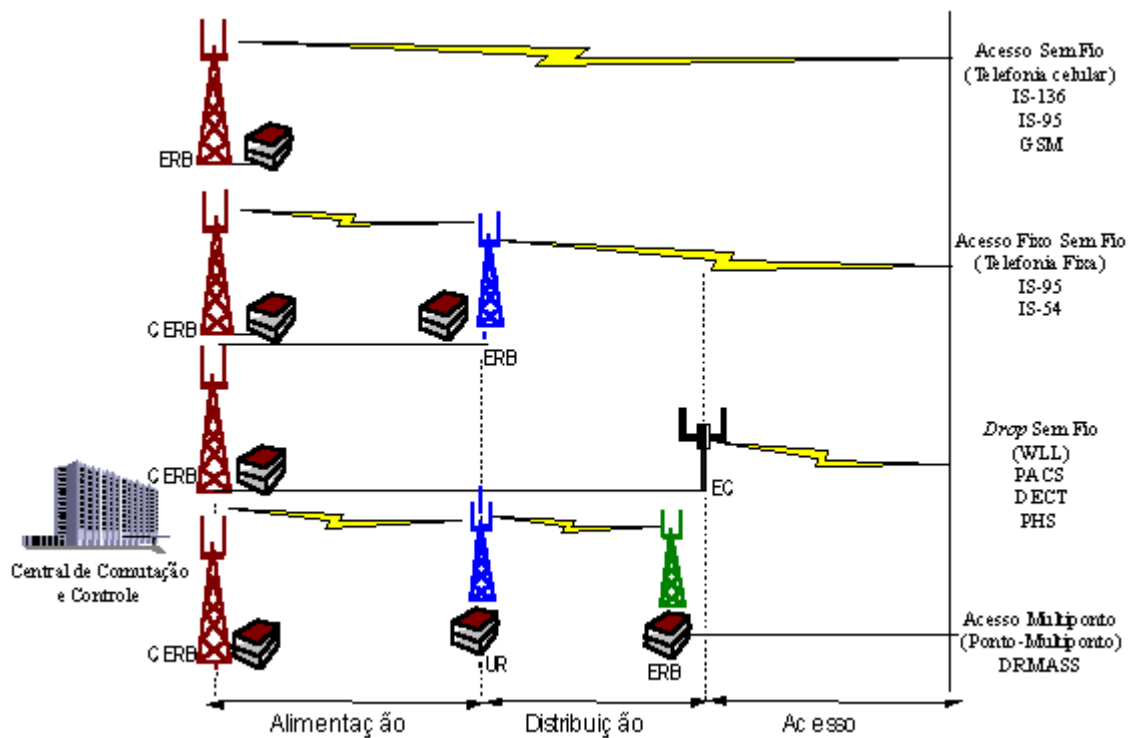
que possam estar submetidas à interferência co-canal. Sabemos que a distância de reuso não é absoluta, e sim, função do raio das células.

---

## 2.5 - Arquitetura do sistema

---

- Um sistema celular é composto basicamente de Centrais de Comutação e Controle (CCC), Estações Rádio Base (ERB), Controladoras de Estações Rádio Base (CERB), Estações Móveis (EM) e Unidades Repetidoras (UR). A escolha da tecnologia adequada depende diretamente do serviço a ser oferecido. Do ponto de vista da operadora, a alternativa deve oferecer facilidade de planejamento, administração e gerenciamento da rede em contraste com os custos.
- As soluções diferem na topologia básica, na frequência de rádio, na modulação, no protocolo de comunicação, no padrão tecnológico, na disponibilidade para o comércio em massa, nos recursos de software, na área de serviço e na técnica de acesso ao meio, ou seja, na forma pela qual os usuários repartem o espectro de frequências. Mostramos na FIG. 2.10 algumas arquiteturas básicas de soluções propostas.



**Figura 2.10 - Arquiteturas de sistemas celulares**

- O Sistema de Telefonia Celular é o mais popular dos sistemas de comunicação existentes. Este sistema resume-se à CCCs, ERBs e sem fio como mostra a FIG. 2.11. Os conceitos de *handoff*, que permite a continuidade da chamada em andamento quando se atravessa a fronteira entre células, e de *roaming*, que permite o acesso ao sistema em outra área de serviço que não àquela em que o assinante mantém seu registro, garantem a mobilidade no sistema. A maioria dos sistemas já citados podem prover este serviço, geralmente nas faixas em torno de 400, 800, 1800 e 1900 MHz.

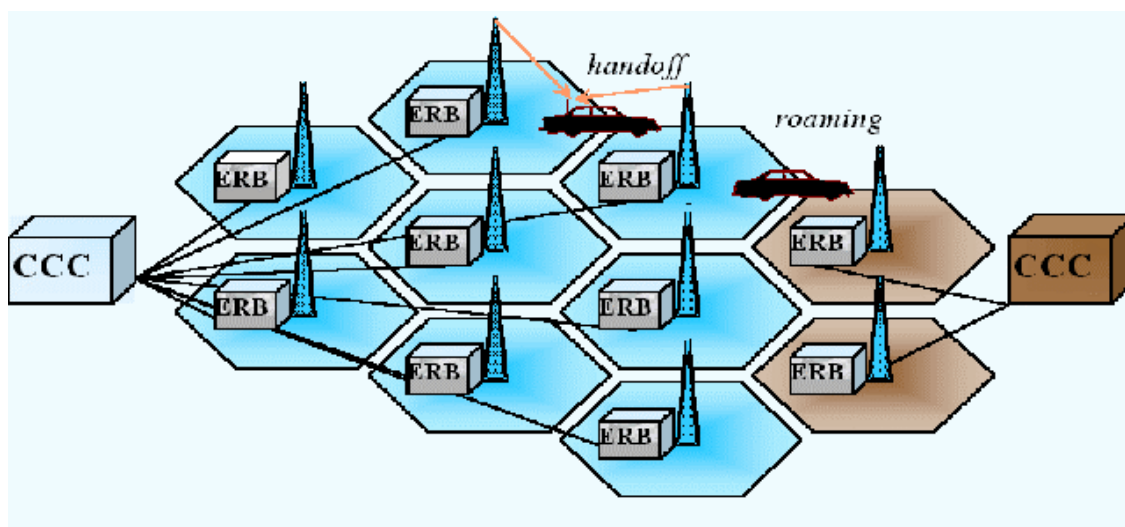


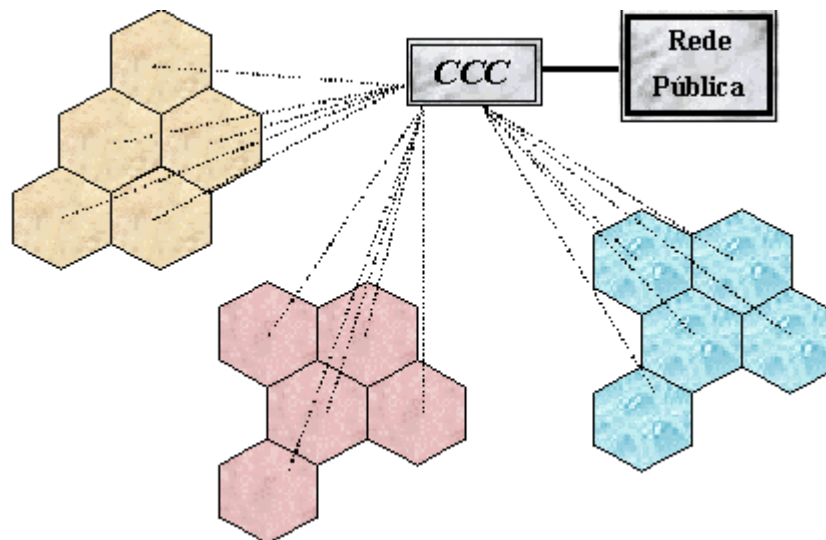
Figura 2.11 - Sistema móvel celular

- As aplicações de Telefonia Fixa (por acesso fixo sem fio) são muito utilizadas no meio rural ou para cobrir uma grande área (raio de 40 km) de baixa densidade de tráfego. Apesar de utilizar as mesmas soluções analógicas (AMPS, TACS, NMT) e digitais (GSM, PDC, IS-95, IS-136) do serviço móvel celular, as funções específicas para prover de mobilidade, como *handoff* e *roaming*, podem não ser utilizadas. Os transmissores trabalham em alta potência nas faixas em torno de 400, 800, 900, 1000, 1800 e 1900 MHz.
- Os sistemas *Wireless Local Loop* (WLL) foram projetados para prover mobilidade *não veicular* e interconexão entre áreas residenciais, escritórios e de acesso público. A tecnologia foi desenvolvida apenas para acesso local via rádio mas ainda são compatíveis com a infra-estrutura da rede pública. Estes serviços podem oferecer transmissão de voz e dados, incluindo interconexão à Rede Digital de Serviços Integrados (RDSI) com ótimo grau de serviço. Os sistemas CT 2, PACS, PHS e DECT são utilizados para estas aplicações fixas ou de mobilidade restrita, tais como PBX sem fio. Os sistemas WLL operam em baixa potência na faixa de 1910-1930 MHz cobrindo pequenas áreas de serviço. Consegue-se atender a uma alta densidade de tráfego em pouco



tempo, por isto, este tem sido o sistema preferido pelas operadoras que querem abocanhar mercados de uma só vez.

- Os sistemas de rádio acesso ponto-multiponto, com o uso do FDMA ou do TDMA, tem sido utilizados para prover comunicação a assinantes em áreas de baixa densidade, remotas e/ou rurais. A técnica de acesso mais utilizada é o TDMA nas faixas de 1.4, 2.3 e 23 GHz. A ERB comunica-se com o assinante via cabo o que torna o sistema pouco flexível.
- Todos estes sistemas ainda podem estar em arquiteturas centralizada ou descentralizada de acordo com as condições de contorno do projeto. Como uma CCC é capaz de controlar diversas áreas de serviço, podemos ter a arquitetura centralizada do sistema como mostra a FIG. 2.12. Para áreas com alta densidade de tráfego ou grande número de ERBs, devido às limitações da CCC, podemos fazer uso da arquitetura descentralizada onde várias CCCs fazem a comutação e o controle de ERBs na mesma área de serviço como na FIG. 2.13.



**Figura 2.12 - Arquitetura centralizada**

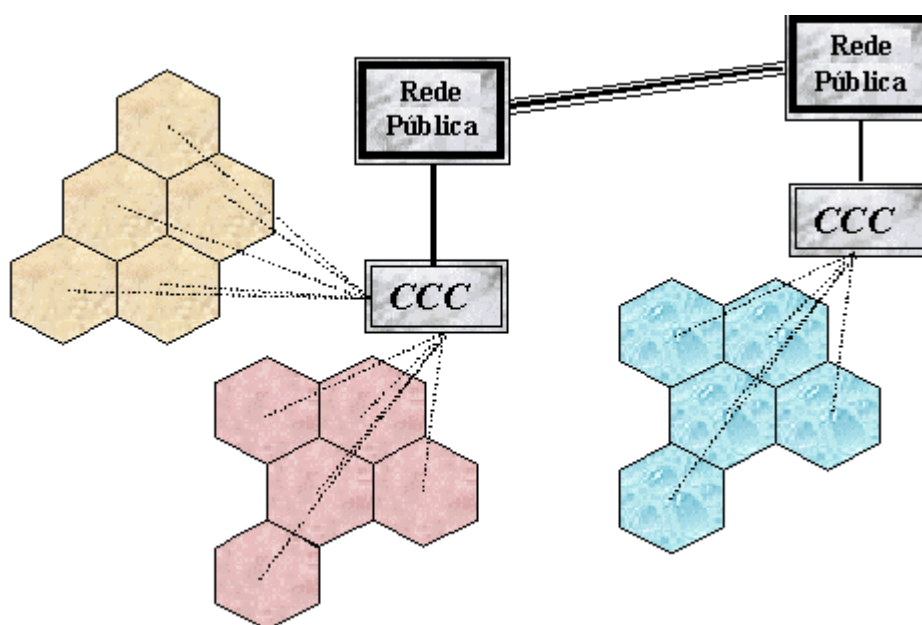


Figura 2.13 - Arquitetura descentralizada

---

## 2.6 - Componentes do sistema

---

*Destacaremos a seguir os principais componentes dos sistemas de comunicação móvel celular e suas funções dentro do sistema.*

---

### 2.6.1 - Estação móvel (EM)

---

- A Estação Móvel é o terminal móvel do usuário composto por monofone, teclado, unidade de controle, bateria, unidade de rádio e antena. Sua função principal é fazer a interface eletromecânica entre o usuário e o sistema. Estes equipamentos podem ser classificados como portátil, veicular ou transportável, dependendo de suas dimensões e capacidade de potência e carga (bateria).

---

### 2.6.2 - Estação rádio base (ERB)

---

- A Estação Rádio Base é a repetidora da informação de voz e dados de controle em meio eletromagnético. Na verdade ela é responsável em fazer o papel de interface entre uma única CCC e diversas Estações Móveis. Cada ERB pode suportar até 154 canais de voz dependendo do fabricante, do sistema e de sua aplicação.
- Cada ERB é composta de um sistema de rádio contendo receptores (Rx), transmissores (Tx), combinadores, divisores, filtros e antenas; de um sistemas de processamento e controle contendo o processador de controle, multiplexadores (MUX), Cabos coaxiais, painel de controle; e da interface com a CCC por um MUX a 2Mbps ou taxa maior.
- A ERB é responsável pela monitoria do sinal recebido de uma EM comunicando à CCC qualquer alteração indesejável em relação a potência ou a interferência no sinal recebido. Outras funções de sinalização também são agregadas à ERB, como o controle de potência das EM, e outros comandos recebidos da CCC.

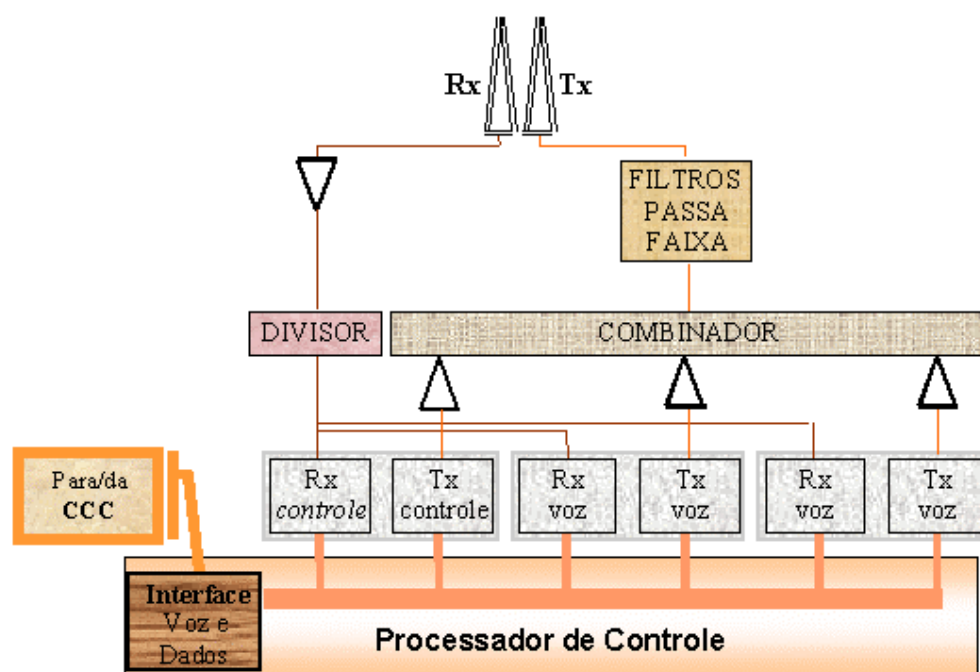
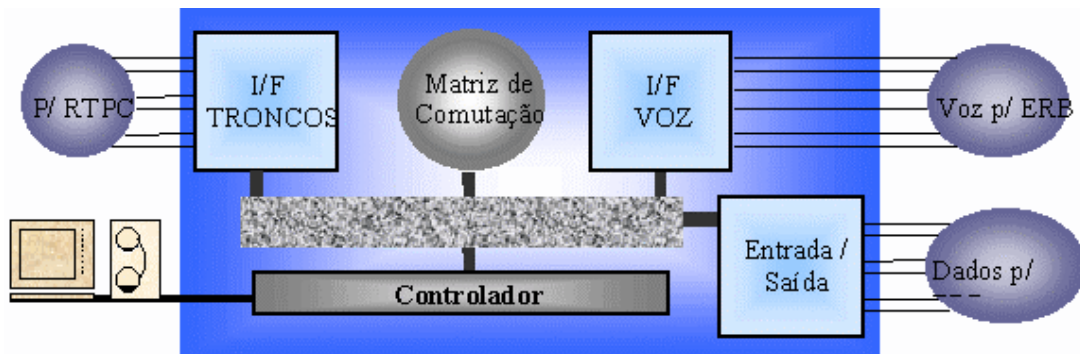


Figura 2.14 - Estação rádio base

### 2.6.3 - Central de Comutação e Controle (CCC)

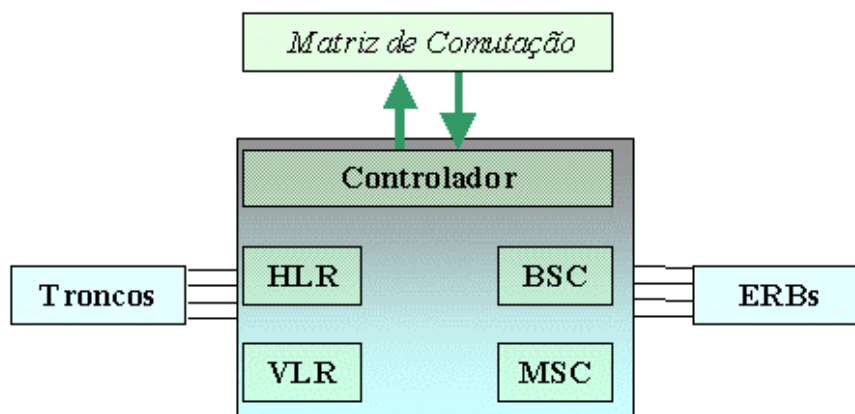
- A Central de Comutação e Controle faz a interface entre o Sistema Móvel e a Rede Pública. Sua estrutura é parecida com a das centrais telefônicas de comutação automática (CPA). Alguns fabricantes adaptaram suas CPA ao sistema móvel sendo que em alguns casos apenas modificações a nível de *software* foram consideradas. Pelas características de modularidade, as CCC podem ser expandidas gradualmente até atingir sua capacidade máxima de gerência de tráfego ou ERB.
- Dado que existem vários padrões, arquiteturas, serviços e sistemas, padronizou-se o protocolo de comunicação *S-41* para interligar CCC de fabricantes diferentes. Mas pode-se caracterizar as CCC pelos equipamentos de entrada e de saída de dados, interface de áudio e dados para a ERB (I/F), terminais

de operação e manutenção, memória de configuração, troncos, matriz de comutação e controlador.



**Figura 2.15 - Central de comutação e controle (CCC)**

- O Controlador é composto do *Home Location Register* (HLR), que é o registro de endereços e identifica cada móvel pertencente a esta área de localização; do *Visit Location Register* (VLR) que é o registro de endereços de visitantes e identifica as EM visitantes de outra área de localização ou área de serviço; do *Base Station Controller* (BSC) que controla cada ERB vinculada a esta CCC; e da *Mobile Switch Center* (MSC) que controla as comutações entre os troncos da Rede Telefônica Pública Comutada e os canais das ERB vinculadas a esta CCC.



**Figura 2.16 - Controlador da CCC**

- A CCC tem como administrar o sistema em termos de comutação, alocação de canais, supervisão das ERB, encaminhamento de tráfego, estatística de tráfego, procedimento de *handoff*, procedimentos de registro de EM locais, registro de *roaming* para EM visitantes, bilhetagem e tarifação do sistema.
- A Central de Controle e Comutação é o cérebro do sistema de comunicação móvel celular.
- A unidade de controle (Controlador) de uma CCC pode ser entendida como um computador que controla funções específicas de uma sistema de comunicação móvel celular, tal como alocação de frequência, controle do nível de potência das EM, procedimento de *handoff*, controle de tráfego, rastreamento, localização, tarifação e associação de canais são fatores de limitação do sistema. Portanto, a capacidade de processamento da unidade de controle nas CCC deve ser maior que a de sistemas de telefonia fixa.
- A unidade de comutação é similar ao das centrais telefônicas fixas, mas seu processamento é deferente. Na comutação telefônica fixa, a duração da chamada não é fator relevante ao sistema, enquanto que em um sistema de co-

municação móvel celular essa duração é função do gerenciamento dos canais e do número de *handoff* processados.

- Dois parâmetros são considerados no projeto dos sistemas de comutação: a acessibilidade e a graduação.
- A **acessibilidade** representa a capacidade de tráfego de um grupo de canais determinada pelo número destes canais que podem ser atingidos pelas chamadas que ingressam no sistema de comutação. Esta é considerada **Constante** quando é igual em todos os instantes, **Plena** quando seu valor é constante e igual à quantidade de troncos do grupo de saída, e **Limitada** em outra situação.
- A **graduação** representa um esquema de interconexão de grupos de canais. Em uma CCC com acessibilidade limitada, canais de entrada são agrupados e associados a um grupo de canais de saída, formando um subgrupo de graduação. O aumento da capacidade de tráfego acontece quando há uma associação eficaz entre os canais de entrada no sistema de comutação e os subgrupos de saída.

---

#### 2.6.4 - Controladora de estações rádio base (CERB)

---

- As Controladoras de Estações Rádio Base fazem apenas a interface entre um conjunto de ERB e uma CCC em alguns sistemas. Na verdade as CREB tomam algumas funções tanto da CCC como das ERB, o que descarrega o processamento centralizado nas CCC. Algumas destas funções são a avaliação do nível de potência do sinal, o controle da relação sinal/ruído nos canais, a monitoria da Taxa de Erro de Bit (*BER*) dos canais, etc..

---

### 2.6.5 - Estação celular (EC)

---

- A Estação Celular resume algumas funções da ERB e trabalha como repetidora de informação de voz e de dados entre ERB e o assinante e é, basicamente, composta por um banco de bateria, ou grupo gerador, e o Controlador de Unidade de Assinante (SUC). Cada EC tem como função a recepção, o tratamento da informação e sua transmissão para o usuário (EM). Assim, a UR interpreta a sinalização proveniente da ERB e executa ações locais ou às retransmite ao usuário.

---

### 2.6.6 - Unidade repetidora (UR)

---

- A UR trabalha como apenas uma repetidora dos canais do sistema, ou seja, apenas retransmite informações entre duas ERB, entre CERB e ERB ou entre a CCC e ERB. Não há processamento local, apenas há recepção, filtragem e retransmissão do sinal em potências e relação sinal/ruído adequadas.

---

## 2.7 - Técnicas de acesso ao meio

---

- Buscando uma maior eficiência do uso do espectro disponível aos serviços de rádio móvel, foram criadas técnicas que permitem o acesso de múltiplos usuários ao meio de transmissão, ou seja, o compartilhamento de canais de rádio. A alocação de canais sob demanda é conhecida por *Demand-Assigned Multiple Access* (DAMA). Três métodos de acesso ao meio se destacaram nos sistemas de comunicação móvel celular diferenciados apenas pela manipulação adequada da frequência, tempo ou código.



- O *Frequency Division Multiple Access* (FDMA) é caracterizado pela alocação de diferentes faixas do espectro para os canais e voz. O *Time Division Multiple Access* (TDMA) faz uso do processamento digital do sinal de voz e multiplexa a informação de diferentes usuários em *slots* de tempo diferentes dentro de um mesmo canal físico. Já o *Code Division Multiple Access* (CDMA) multiplexa a informação digital por códigos de taxa mais elevada espalhando o espectro do sinal em uma faixa larga compartilhada com outros códigos. Assim a comunicação *duplex* pode ser feita por divisão de frequência, de tempo ou de código, ou seja, utilizando *Frequency Division Duplex* (FDD), *Time Division Duplex* (TDD) ou *Code Division Duplex* (CDD).
- Os sistemas também podem ser classificados com relação a largura de faixa do canal. Assim, um sistemas de faixa estreita tem seu espectro dividido em canais de faixa suportando taxas inferiores a 2 Mbps, enquanto na arquitetura de faixa larga, todo o espectro é compartilhado pelos usuários. O FDMA é intrinsecamente uma arquitetura de faixa estreita, enquanto CDMA é uma arquitetura de faixa larga. TDMA, por outro lado, pode ser implementado como de faixa estreita ou de faixa larga.
- A escolha do método de acesso para sistemas de rádio móvel é uma tarefa um tanto complexa pois todos os métodos FDMA, TDMA e CDMA apresentam vantagens e desvantagens.

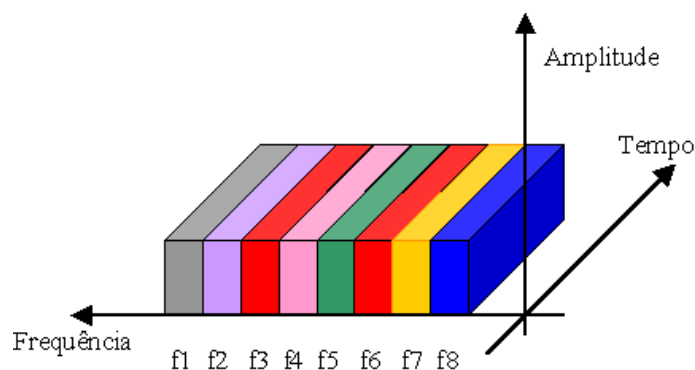
---

### 2.7.1 - FDMA

---

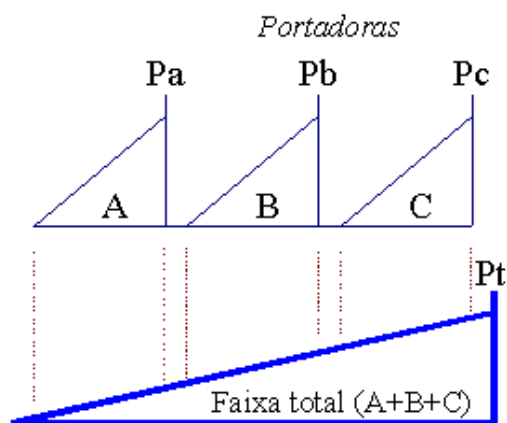
- O Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência é o método mais comum de acesso, principalmente entre os sistemas analógicos. Neste caso, o espectro é dividido em canais onde cada assinante sintoniza sua portadora. Podemos fazer analogia a pares que querem se comunicar, onde um par utiliza um tubo, representando uma portadora. A informação de um par que se propaga em um tubo não interfere na que se propaga em outro paralelo.

- O número de canais no sistema será função da largura de cada canal. Dentre os canais disponíveis, uma pequena porção é dedicada a canais de controle, sendo os demais utilizados para tráfego de voz. No caso do sistema AMPS o espectro é dividido em canais de 30 kHz usados durante toda a duração de uma chamada.



**Figura 2.17 - Método FDMA**

- Os canais de uma ERB podem ser acessados por qualquer EM dentro de sua área de cobertura. Para isto basta a EM sintonizar um portadora, sendo a alocação de canais feita sob demanda pela CCC. O esquema *Single Channel Per Carrier* (SCPC) implementa o FDMA atribuindo apenas um canal por portadora.



**Figura 2.18 - Esquema SCPC**

- Os equipamentos eletrônicos de uma ERB apresentam aspectos de não linearidade. Assim, a informação transmitida pode ser afetada por interferência. O espalhamento espectral corresponde ao alargamento do canal excedendo sua própria faixa causando interferência nos canais adjacentes. A intermodulação acontece quando harmônicas de certas frequências interferem em outras. A transferência de modulação promove distorções na fase e na amplitude do sinal. A supressão do sinal é resultante da amplificação não linear do sinal.
- Na verdade o FDMA compõem os sistemas que utilizam outras técnicas. O TDMA, por exemplo, os canais físicos são definidos pelas portadoras do FDMA. Em seguida definem-se os canais lógicos como *slots* de tempo periódicos dentro destes canais. No CDMA, o espectro é dividido em grandes canais de 1,25 MHz pelo FDMA.
- A tecnologia empregada para implementar o FDMA é bastante conhecida, pois as técnicas utilizadas não diferem muito das usadas em sistemas analógicos de rádio. Nesta caso não há necessidade de equalização dos canais pois estes operam com largura de banda coerente. Por outro lado as EM são caras já que necessitam de muitos filtros de faixa estreita. Quando combinados com outros métodos, a redução da taxa de bit informação aumenta diretamente na capacidade do sistema, mas a taxa de transmissão de bits é fixa.

---

### 2.7.2 - TDMA

---

- O Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo reparte um canal físico em diversos *slots* de tempo fazendo com que cada canal possa ser usado por mais de uma pessoa, uma de cada vez. A cada assinante é alocado uma seqüência periódica e *slots* de tempo dentro de um canal físico, assim uma mesma portadora pode ser compartilhada por diferentes assinantes. Neste caso a analogia é, por exemplo, com três pares que dividem o tempo de acesso a um único tubo (a portadora). Cada par deste grupo tem direito a usar o tubo por um intervalo de tempo que acontece periodicamente. Mesmo assim outros grupos

de três pares podem utilizar outros tubos. Desta forma, o TDMA utilizado pelos sistemas digitais é, na verdade, uma combinação FDMA/TDMA.

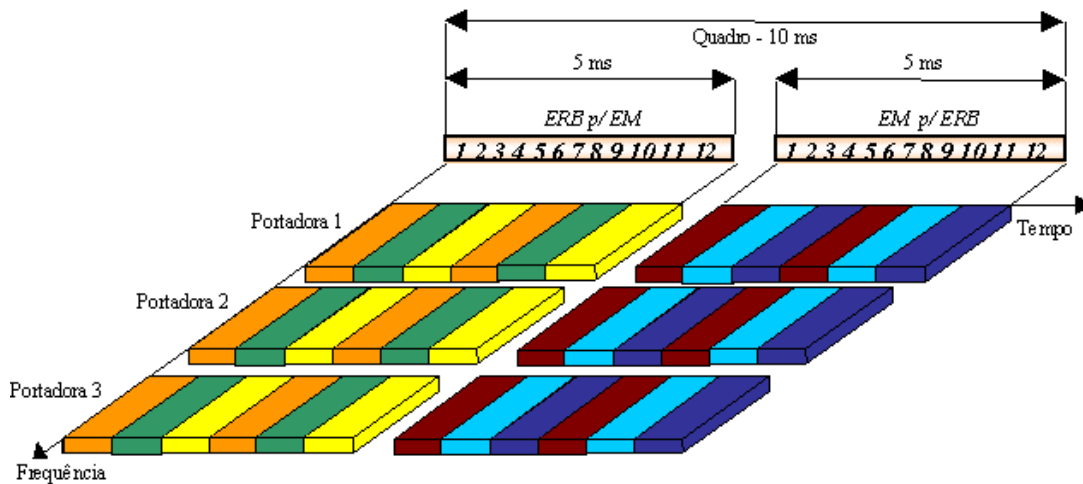


Figura 2.19 - Método TDMA

- Observe que quanto maior o número de canais lógicos por portadora, maior a taxa de transmissão e maior a largura de faixa necessária ao canal. Técnicas de processamento digital e compressão do sinal de voz reduzem as taxas de transmissão e a largura dos canais. Na verdade a transmissão da informação neste esquema é feita forma *buffer-and-burst*. A informação é primeiramente armazenada em depois enviada em rajadas dentro de seu *slot* de tempo correspondente, assim diversas EM alternam a transmissão e recepção de *bursts* de dados através de uma portadora comum compartilhada. Este método apresenta um aumento significativo no tráfego atendido em relação ao FDMA.
- Pela característica digital do sistema há maior imunidade a ruído e interferência e, também, mais segurança no enlace de comunicação promovendo privacidade ao usuário. Há também a necessidade de equalização, mas esta pode ser usada para combater o desvanecimento.

- Uma grande vantagem deste método é que as taxas de transmissão podem ser variáveis em múltiplo da taxa básica do canal. A potência do sinal e a taxa de erros de bit podem ser controladas facilitando e acelerando o processo de *handoff*.
- O método TDMA é atribuído à sistemas digitais como GSM, D-AMPS (IS-136) e PDC.

---

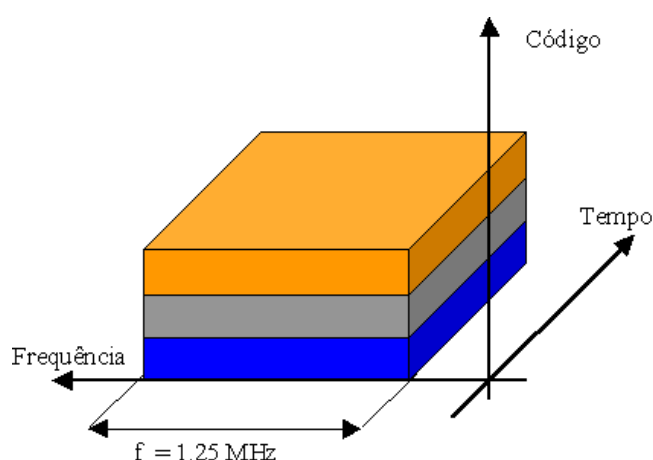
### 2.7.3 - CDMA

---

- O Acesso Múltiplo por Divisão de Código foi desenvolvido nos EUA pelo segmento militar. Sua primeira utilização foi para a comunicação entre aviões de caça e rádio controle de mísseis teleguiados. Neste método de acesso as EM transmitem na mesma portadora e ao mesmo tempo, mas cada comunicação individual é provida com um código particular. Isto garante alta privacidade na comunicação.
- Voltando a analogia, podemos considerar não mais os tubos, mas uma sala repleta de pares que se comunicam, só que cada par fala um idioma diferente que só eles entendem. Quanto mais diferentes os idiomas utilizados nesta sala, menor a probabilidade de confusão na comunicação (interferência entre os códigos). Por exemplo, o português e o espanhol são idiomas bastante parecidos; já o português e o alemão têm bastante diferenças.
- As conexões simultâneas são diferenciadas por códigos distintos de baixa correlação. Seqüências digitais do tipo *pseudo-noise* (PN) são geradas por códigos pseudo-randômicos (PN *codes*) e ortogonais com taxa alta de transmissão por *Direct Sequence*, ou *Direct Spread*. Obtêm-se, então, um sinal de faixa larga por *Spread Spectrum* (espalhamento espectral) pelo fato de se transmitir o sinal em uma taxa maior que a taxa da informação. A largura de faixa padronizada para os serviços móvel celular é de 1,25 MHz. A razão en-

tre a faixa espalhada do sinal e sua faixa original é conhecida como ganho de processamento.

- Na verdade, o *Direct Sequence* não é o único esquema de modulação capaz de espalhar o sinal. Serão apresentados outros esquemas de modulação por espalhamento espectral do sinal apresentada no Capítulo 3. A utilização destes esquemas consiste apenas em especificação de projeto do sistema.



**Figura 2.20 - Método CDMA**

- O código utilizado na transmissão deverá ser conhecido na recepção. Na teoria poderíamos ter tantos assinantes quantos códigos geradores existentes, mas isto não é verdade uma vez que a comunicação se processa em um ambiente ruidoso. Cada EM gera uma parcela do ruído total do sistema que é proporcional ao número de chamadas em curso. Assim, o receptor correlaciona os sinais recebidos com o código gerador multiplicando-os, detectando o sinal desejado que agora se destaca sobre os demais. Um sistema de comunicação utilizando o CDMA é mostrado em blocos na FIG. 2.21.

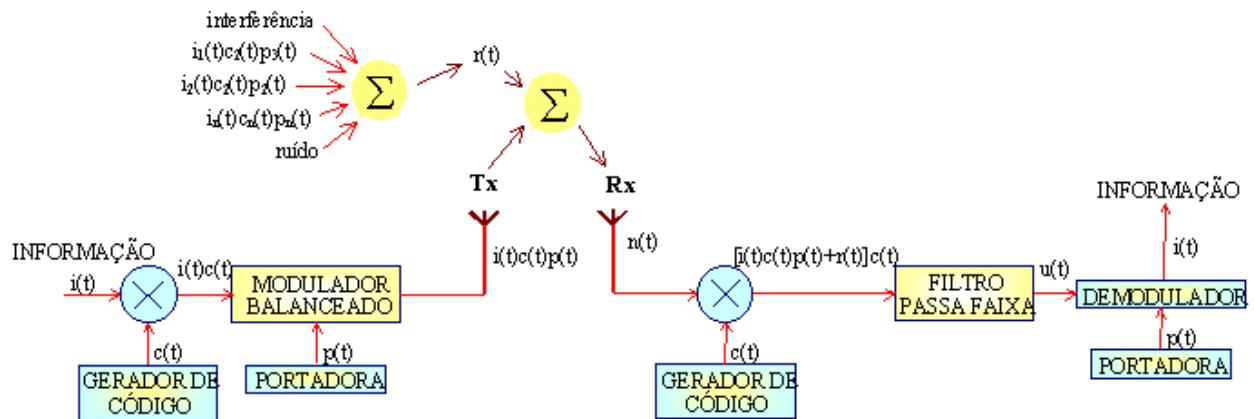


Figura 2.21 - Diagrama de comunicação CDMA

- No processo de transmissão pelo método CDMA a voz é primeiramente codificada, passa por um expensor (*spreader*) que a multiplica por seqüência pre-estabelecida e única para cada EM. O sinal de espectro agora espalhado é modulado em amplitude e transmitido. Yacoub exemplifica em [1] o processo de transmissão e recuperação da informação pelo método CDMA descrito pela FIG. 2.22.

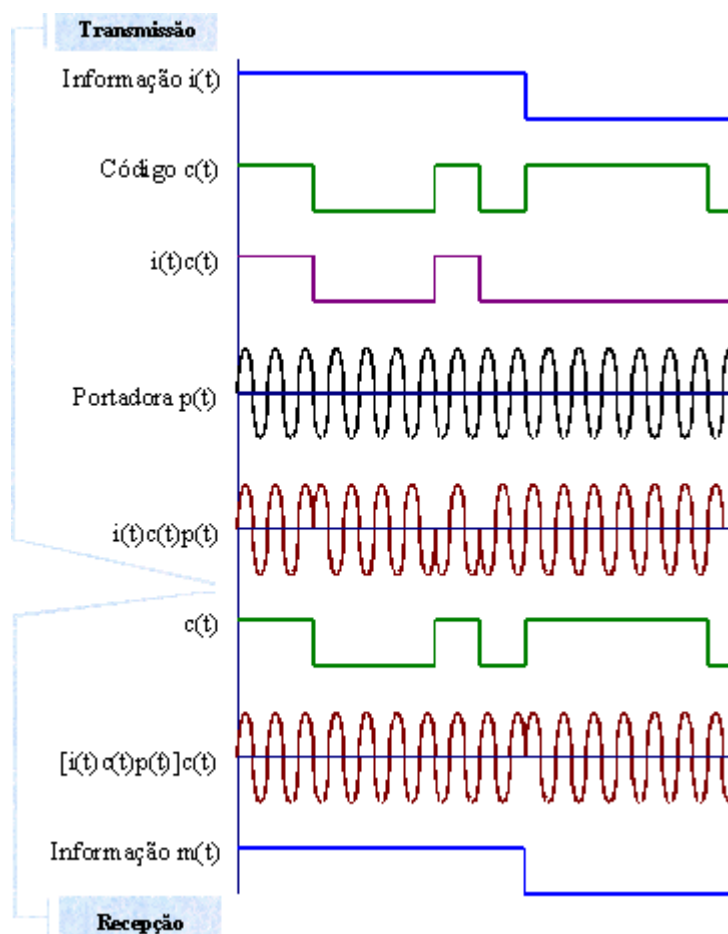


Figura 2.22 - Transmissão por espalhamento espectral

- O ruído pode ser trabalhado utilizando-se taxas menores nos períodos de silêncio em uma conversação. O controle da potência nas EM equaliza o nível de interferência provocado por usuários próximos ou distantes da ERB. A utilização de antenas diretivas, limitando o ângulo de chegada dos sinais, também reduz o nível do ruído.
- Verifica-se que o fator limitante do método CDMA é a relação sinal-ruído por EM. Assim, a capacidade do sistema é determinada pelo nível da relação sinal-ruído e pelo ganho de processamento. Mesmo assim considera-se um ganho da ordem de 8 vezes em relação à capacidade do método FDMA.



- Os sistemas que utilizam o método CDMA tem como padrão de reuso somente uma célula por *cluster*. Isto dispensa o planejamento de freqüências. O que diferencia uma célula de outra são os conjuntos de códigos utilizados já que todas as células utilizam a mesma freqüência portadora. Isto facilita a implementação do procedimento de *soft-handoff*. Neste procedimento a EM cruzando a fronteira entre duas células poderá utilizar os sinais das duas ERB ao mesmo tempo, transmitindo o mesmo código, combinando os sinais recebidos para melhorar a recepção.
- Os sistemas que utilizam o CDMA seguem o padrão IS-95 com taxa de espalhamento a 1,2288 Mbps utilizando uma portadora de 1,25 MHz de faixa. O uso de uma taxa básica de 9,6 kbps implica em maior capacidade do sistema e em menor qualidade de transmissão. Utilizando 14,4 kbps teremos uma menor capacidade do sistema, porém uma melhor qualidade de transmissão. Um fato curioso é que as operadoras podem prover serviços em ambas as taxas com tarifas diferenciadas.
- Para a expansão de um sistema baseado em CDMA basta aplicar e aceitar uma degradação do grau de serviço pelo aumento do número de usuários no sistema, o que simplesmente aumenta a interferência total, e não implica em nenhuma alteração física do sistema.

---

## 2.8 - Sinalização de controle

---

- A sinalização de controle em sistemas de comunicação móvel celular pode ser feita tanto por canais de voz quanto por canais de controle. Esta sinalização envolve os processos de início de chamada pela EM, de início de chamada pela CCC, procedimento de *handoff*, procedimento de registro no *roaming*, e para a própria manutenção da chamada.

- Como vimos, os canais dos sistemas de comunicação móvel celular podem ser classificados como canais de voz ou de controle. Os canais físicos também podem ser subdivididos em outros canais lógicos nos sistemas digitais TDMA e CDMA, carregando tanto voz quanto informação, nos canais de voz, ou carregando mensagens específicas em canais lógicos dentro dos canais de controle. São 21 os canais físicos de controle no FDMA e no TDMA.
- Os canais do sistema móvel ainda podem ser classificados quando a direção de propagação como Canal Direto (*Forward Channel*), da ERB para as EM; ou Canal Reverso (*Reverse Channel*), da EM para a ERB. Assim teremos basicamente:
  - FOCC – *Forward Control Channel*
  - RECC – *Reverse Control Channel* (também conhecido como Canal de Acesso)
  - FVC – *Forward Voice Channel*
  - RVC – *Reverse Voice Channel*
- Os FOCC ficam o tempo todo no ar levando informações inerentes ao sistema a todos as EM. São mensagens como de Identificação do Sistema (SID), quantos e quais RECC estão disponíveis na região, informação de *paging* quando a CCC procura por uma determinada EM, o número do primeiro canal de voz que a EM deve sintonizar para atender uma chamada, dentre outras.
- O RECC é o canal de acesso do móvel ao sistema, tanto para dar início a uma chamada, como para responder ao *paging*. Assim teremos as mensagens de confirmação de ordens recebidas pelo FOCC, de origem de chamada, de ordem de registro, etc.. Quando uma EM precisa enviar uma mensagem, esta busca o RECC de mais alta potência recebida, sintoniza-o e envia a chamada

no primeiro *slot* livre. Perceba que todas as EM de uma mesma região tentarão transmitir pelo mesmo RECC.

- Os canais de voz também carregam mensagens de controle. Em canais lógicos, nos sistemas digitais, ou através de rajadas de dados de aproximadamente 0,1 segundo nos sistemas analógicos. Neste último caso, utiliza-se o esquema FSK a 10 kbps. O FVC transmite ordens da CCC ou da ERB à EM. O RVC responde às ordens e envia outras informações como o término da chamada.
- É importante ressaltar que cada sistema possui seu próprio método de sinalização, suas próprias mensagens e protocolos. Todas estas características serão detalhados adiante nos estudos de cada um dos sistemas AMPS, TDMA, CDMA, GSM e PHS. Mesmo assim, apresentamos a seguir o que consideramos os procedimentos básicos de sinalização para funcionamento dos sistemas de comunicação móvel celular.

---

### 2.8.1 - Processamento de chamada originada pela EM

---

- O procedimento de origem de chamada pela EM começa com o usuário digitando o número a ser chamado e enviando esta mensagem na seqüência:
  - A EM sintoniza o FOCC de melhor sinal (maior potência) na região e obtém informações sobre quais RECC operam na região.
  - A EM escuta o FOCC esperando pela informação que o RECC está desocupado e em caso afirmativo envia a mensagem de origem de chamada e sua identificação.
  - Se houver colisão pela transmissão concomitante com outra EM o FOCC informa as EM da região.

- Dependendo do algoritmo de acesso ao meio, *Slotted ALOHA* por exemplo, a EM faz nova transmissão da mensagem após a informação do RECC desocupado.
- A ERB recebe a informação e passa para a CCC que testa se a EM pertence ao sistema. Caso contrário há fraude ou é caso de *roaming* ainda não processado.
- A CCC contata a rede pública a busca do número chamado ou processa internamente caso este seja de uma outra EM do sistema.
- Sendo atendida a chamada a CCC determina que a ERB transmita via FOCC a informação do primeiro par FVC/RVC designado à EM e sua identificação.
- A EM autentica a identificação recebida e sintoniza o par FVC/RVC designado.
- Agora, pelo RVC, a EM devolve a informação de que está sintonizado ao par sempre seguida da sua identificação.
- A ERB passa a informação à CCC que verifica a identificação da EM e comuta o canal afluente de voz à ERB em que a EM se encontra e começa a tarifação.
- A informação transmitida à ERB é então modulada e transmitida pelo VC à EM.

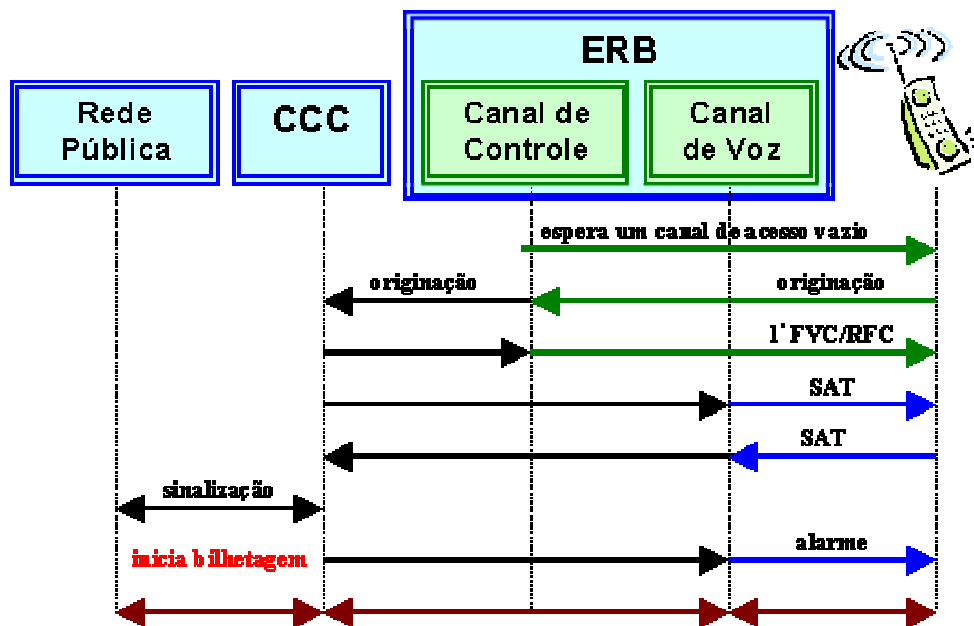


Figura 2.23 - Originação de chamada pela EM

### 2.8.2 - Processamento de chamada terminada pela EM

- O procedimento de término de chamada pela EM é iniciada pelo usuário apertando a tecla de fim de chamada e, em seqüência:
  - A EM envia a sinalização por um *burst* dentro do RVC.
  - A ERB recebe esta informação, separa do sinal de voz e transmite uma mensagem de fim de chamada à CCC.
  - A CCC para a tarifação e determina que a ERB libere o par FVC/RVC utilizado na chamada apenas desligando o rádio. Ao mesmo tempo a CCC libera o tronco da rede pública.

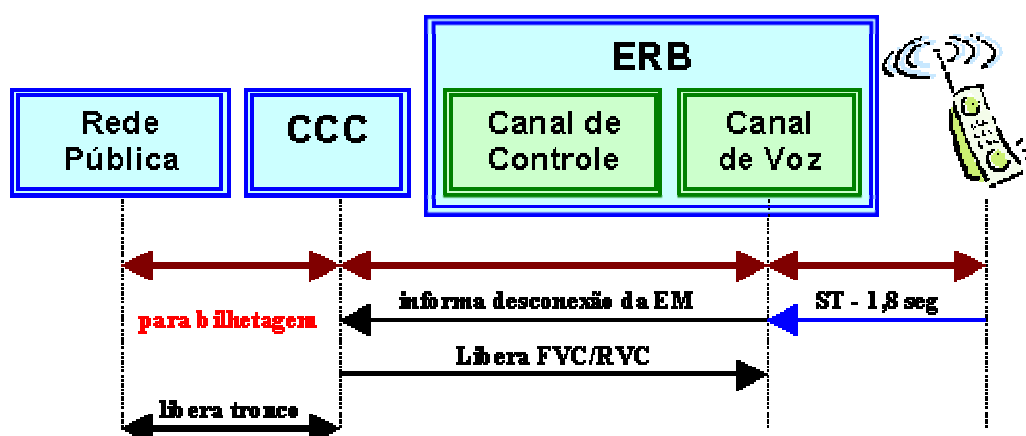


Figura 2.24 - Término de chamada pela EM

### 2.8.3 - Processamento de chamada originada pela rede pública

O procedimento de origem de chamada pela rede pública começa com a rede ocupando um tronco e sinalizando à CCC e, em seqüência:

- A CCC primeiro verifica se a identificação da EM solicitada consta em seu registro local ou de visitantes.
- Em caso afirmativo a CCC determina que todas as ERB de seu sistema enviem pelos FOCC a informação de *paging* contendo a identificação da EM.
- As EM estão sempre escutando o FOCC de melhor sinal em sua região. Assim, a EM percebe sua identificação em processo de *paging*.
- A EM então escuta o FOCC pela informação do RECC desocupado e responde enviando também sua identificação.
- A ERB recebe a informação e envia confirma a localização da EM à CCC.
- A CCC escolhe um par FVC/RVC daquela ERB e informa à ERB.
- A ERB envia pelo FOCC a informação do par e a identificação da EM.
- A EM sintoniza no par designado e devolve a sinalização agora pelo RVC.

- A ERB informa à CCC que comuta o canal afluente à ERB iniciando a tarifação.
- A informação transmitida à ERB é então modulada e transmitida pelo VC à EM.

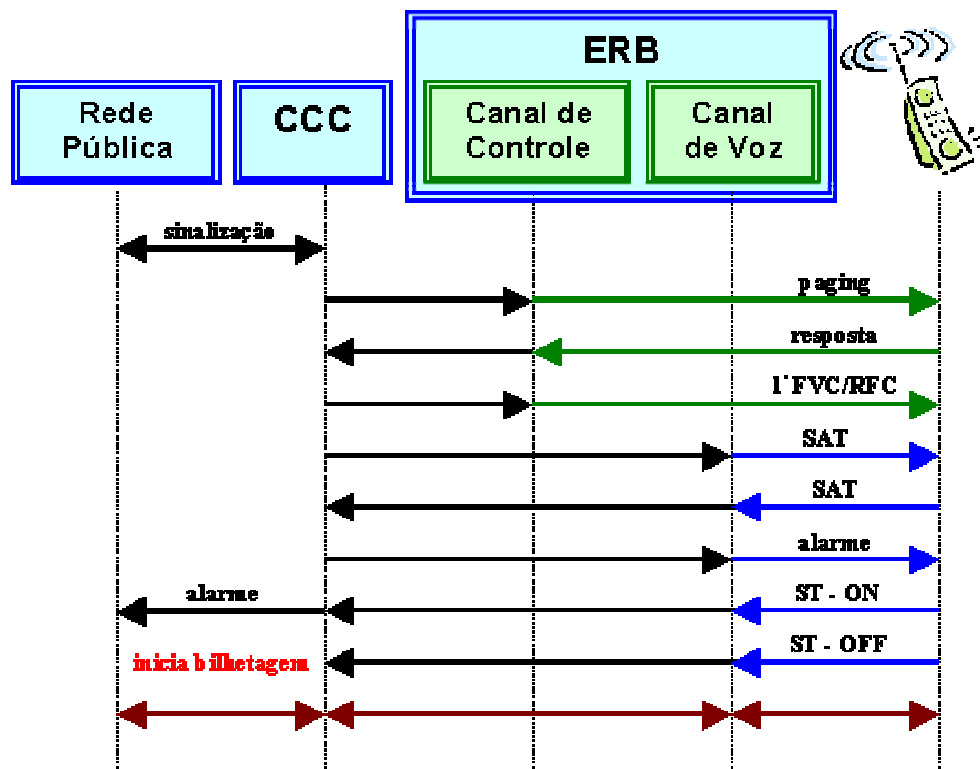


Figura 2.25 - Originação de chamada pela Rede Pública

#### 2.8.4 - Processamento de chamada terminada pela Rede Pública

- O procedimento de término de chamada pela rede pública inicia-se com a colocação do fone no gancho e, em seqüência:
  - A CCC é informada pela rede pública de término de chamada e libera o tronco.

- A CCC envia a ERB informação de fim de chamada e termina a tarifação.
- A ERB envia pelo FVC ordem à EM para que libere o par RVC.
- A EM devolve a sinalização à ERB confirmando a ordem e desliga seu transmissor.
- A ERB libera o par FVC/RVC e informa à CCC que este par já está disponível.

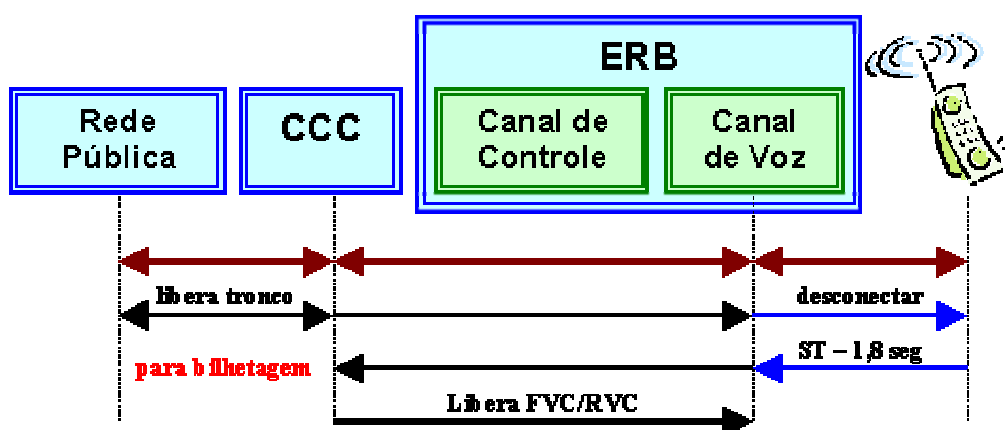


Figura 2.26 - Término da chamada pela Rede Pública

### 2.8.5 - Procedimento de *handoff*

- O procedimento de *handoff* é iniciado quando a ERB detecta que o nível do sinal recebido da EM está abaixo do limiar permitido ao sistema e, em sequência:
  - A ERB informa a CCC que há a necessidade de *handoff*.



- 
- A CCC determina que as ERB adjacentes à primeira monitorem o sinal recebido da EM pelo RVC.
  - As ERB retornam à CCC a informação do nível do sinal recebido.
  - Com base no nível do sinal em cada ERB e considerando a disponibilidade de canais nestas ERB, a CCC reserva um novo par FVC/RVC nesta ERB.
  - A CCC determina que a primeira ERB informa à EM via FVC, em *burts*, o número do novo par FVC/RVC e que os sintonize.
  - A EM envia uma sinalização à primeira ERB confirmando a ordem e sintoniza o novo par e começa transmitir.
  - A nova ERB começa a receber o sinal da EM e informa à CCC.
  - A CCC comuta o tronco para a nova ERB dando prosseguimento à conversação e determina que a primeira ERB libere o antigo par FVC/RVC.

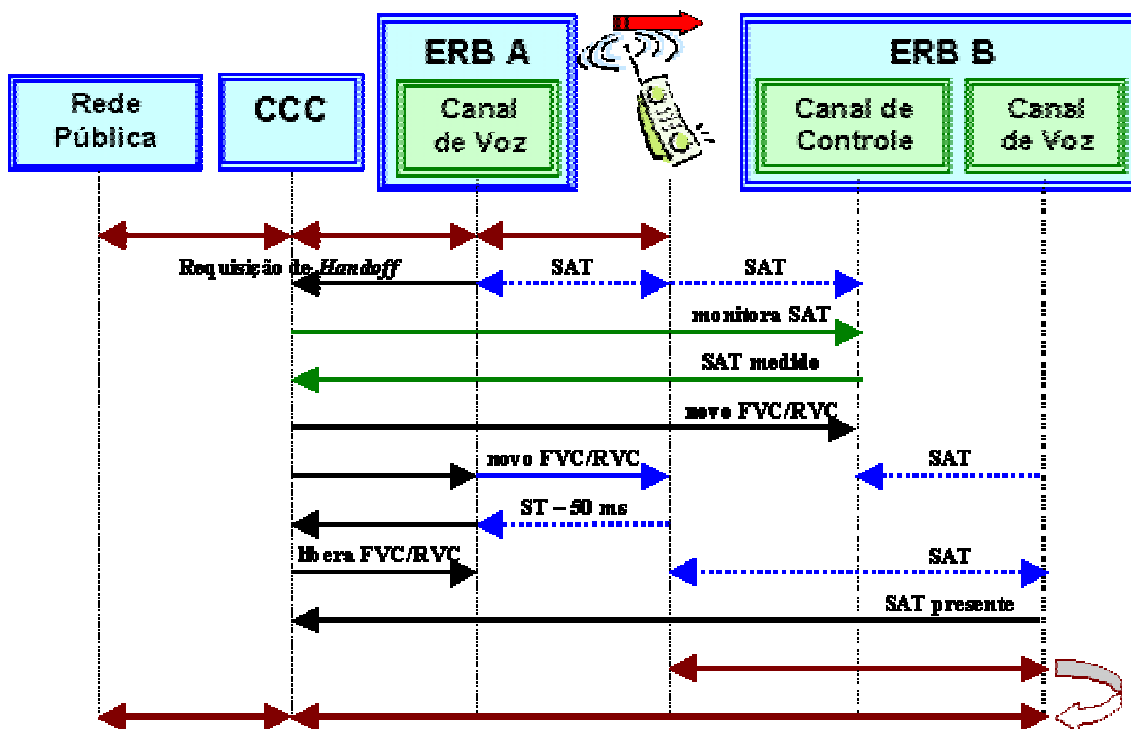


Figura 2.27 - Procedimento de *handoff*

### 2.8.6 - Procedimento de *roaming*

- Quando uma EM sai de sua área de localização, seja dentro do sistema controlado pela mesma operadora, ou para outro sistema o procedimento de *roaming* é iniciado. O processo começa quando a EM verifica pelo FOCC que a identificação do sistema não corresponde àquela em seu registro interno. Então:
  - A EM solicita a CCC via RECC seu registro no sistema.
  - A CCC verifica que esta EM não se encontra no seu *Home Location Register* (HLR) nem no seu *Visit Location Register* (VLR).

- Esta CCC contacta a CCC original da EM informando que está agora cadastrada em seu VLR.
- A CCC original da EM atualiza seu HLR, para que qualquer chamada para esta EM seja comutada para a outra CCC.
- VLR da nova CCC atribui à EM uma identificação fictícia para efeito de tarifação.
- Através do VLR a nova CCC faz a tarifação diferenciada para a EM em *roaming*.

---

## Capítulo 3 - Esquemas de modulação e codificação do sinal

---

*Este Capítulo tem por objetivo apresentar ao leitor alguns esquemas de modulação do sinal para a transmissão bem como as técnicas de codificação e compressão mais utilizadas em sistemas de comunicação móvel celular para codificação do sinal de voz.*

---

### 3.1 - Transmissão de sinais

---

- Os esquemas de modulação do sinal tem por objetivo adequar as informações a serem transmitidas aos meios de transmissão. Esta transmissão de sinais se faz tanto por esquemas de modulação analógicos como os digitais. Os esquemas analógicos foram os primeiros a serem implementados e propunham a transmissão de ondas senoidais proporcionais em amplitude, em fase, em frequência ou em suas combinações, à amplitude do sinal original contendo a informação. As técnicas digitais surgiram antes das analógicas mas só foram realizáveis com a evolução tecnológica.
- A seleção do esquema de modulação deve atender a um conjunto de critérios que garantam a comunicação livre de erros e interferências, com eficiência de potência e de espectro.
- A eficiência de potência é delimitada por uma potência máxima de 100 Watts definida pelo FCC por cada antena de uma ERB, o que também limita o número de canais por célula.
- A eficiência de espectro, o objetivo é diminuir ao máximo a largura do canal de comunicação. Os sistemas analógicos preferem as modulações FM para a voz e FSK para dados de sinalização e controle. Já os sistemas digitais fazem

uso dos esquemas de modulação FSK e PSK associados às técnicas de processamento digital do sinal de voz.

- Os problemas de interferência ocorrerem quando os produtos de intermodulação são próximos das portadoras do sistema. A utilização de amplificadores não lineares classe C é geralmente associada a modulação QPSK para eliminar este problema.
- Métodos de detecção e correção de erro baseados na inserção de *bits* redundantes ou pelo processo de *Interleaving* eliminam possíveis problemas causados pelos ruídos. Esta é uma vantagem dos sistemas digitais. A detecção de erro na recepção e a impossibilidade de correção permite aos sistemas, se houver tempo hábil, retransmitir o bloco contendo o erro através de *Automatic Repeat Request* (ARQ).
- As técnicas de acesso ao meio *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), TDMA e CDMA, a serem estudadas, sofrem diretamente com parâmetros de transmissão. Os ruídos no sistema AMPS são claramente detectados pelo usuário no canal de voz. O sistema TDMA faz uso do processamento digital da voz para maior eficiência do espectro. O controle automático de potência da EM compõe fator de projeto do sistema CDMA.
- Detalharemos a seguir os esquemas de modulação e as técnicas de codificação dos sinais de voz e dados de controle e sinalização supra citados, dentre outras.

---

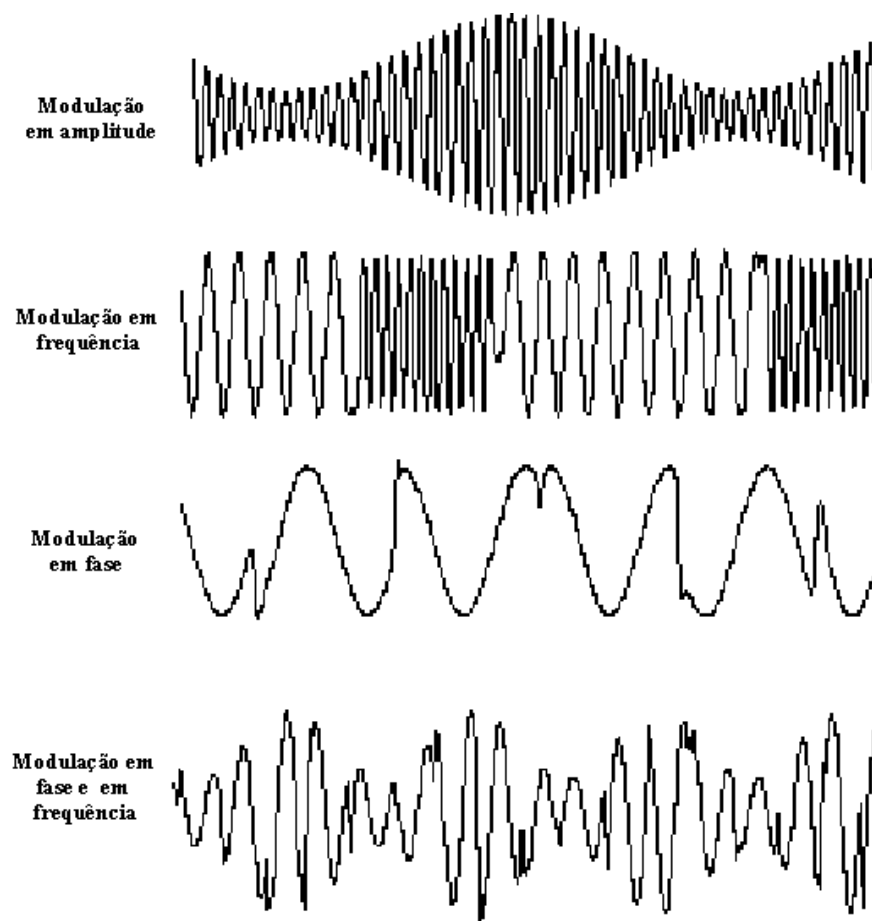
### 3.2 - Esquemas de modulação analógicos

---

- Em 1905, Fesseden obteve sucesso em uma experiência de transmissão de informação via rádio pela utilização de uma técnica chamada Modulação em

Amplitude (AM). Já em 1935, Edwin Armstrong apresenta a Modulação em Freqüência (FM), um caso especial da Modulação em Fase (PM), como técnica eficaz de transmissão via rádio.

- Nestas técnicas os sinais transmitidos no meio são funções contínuas da forma de onda da mensagem. Tanto a amplitude, a fase ou a freqüência de uma onda portadora podem ser continuamente variadas de acordo com a informação a ser transmitida. Mostramos alguns exemplos destes esquemas analógicos de modulação na FIG. 3.1.



**Figura 3.1 - Esquemas analógicos de modulação do sinal**

- Apresentamos a seguir alguns fundamentos das técnicas de modulação analógicas mais utilizadas nos sistemas de comunicação de rádio móvel.

### 3.2.1 - Amplitude modulada (AM)

- A técnica de amplitude modulada consiste em transladar o espectro do sinal de voz para uma frequência superior adequada para a transmissão. Observe que quanto maior forem as frequências transmitidas menor serão as dimensões das antenas.
- Considere um sinal de voz representado por  $g(t)$  na FIG. 3.3 tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. O sinal de voz, por suas características, pode ser bem representado na faixa de 300 Hz a 3,8 kHz. Isto significa dizer que um sinal de voz pode ser representado pela soma de ondas senoidais, com suas respectivas amplitudes, oscilando para cada frequência nesta faixa. Considera-se para efeito de projeto uma faixa de 0 a 4 kHz para representar a voz humana. Assim temos  $f_m = 4$  kHz na FIG. 3.2.

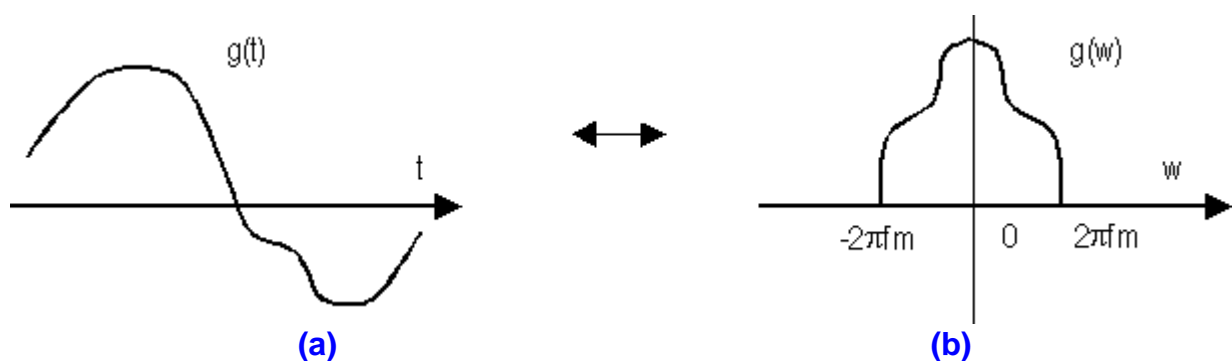
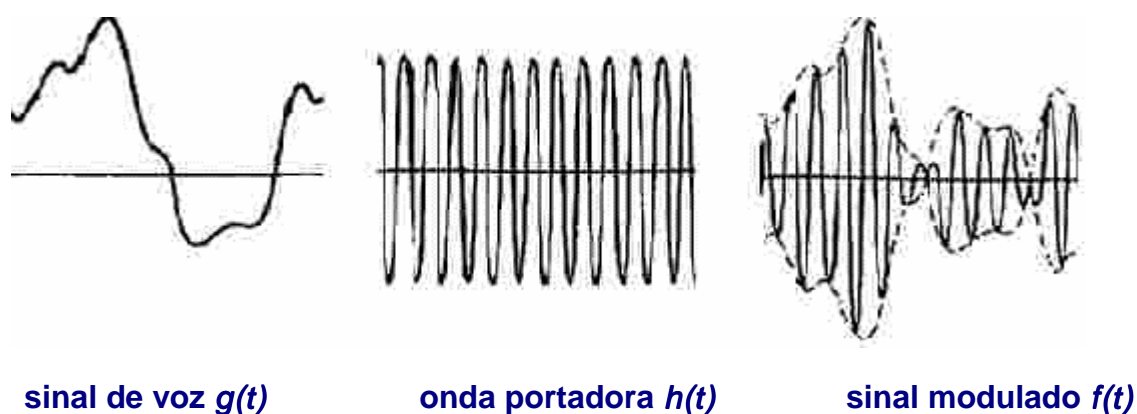


Figura 3.2 - O sinal no domínio do tempo (a) e da frequência (b)

- A modulação em amplitude AM consiste em eleger uma frequência que determina uma onda portadora e operar a convolução entre o sinal de voz e esta portadora. O sinal resultante possui as mesmas características de amplitude

do sinal original, mas agora está deslocado em frequência para a frequência central igual a da portadora.

- Podemos observar, como exemplificado na FIG. 3.3, que a onda resultante é uma onda senoidal com frequência igual ao da portadora, mas com sua amplitude variando de acordo com a amplitude do sinal de voz original.



**Figura 3.3 - Modulação AM do sinal de voz**

- A portadora modulada em amplitude  $f(t)$  é dado pela EQUAÇÃO 3.1 onde observa-se que o sinal de voz  $g(t)$  representa a variação da amplitude da portadora  $h(t) = \cos(w_p.t)$ .

$$f(t) = g(t) \cdot \cos(w_p.t) \quad (3.1)$$

onde  $w_p$  é a frequência da portadora  $h(t)$ .

- O processo de recuperação do sinal na recepção, chamado de demodulação, é bastante simples. Basta multiplicar o sinal recebido por uma onda senoidal da mesma frequência da portadora  $w_p$ , o que repetiria uma convolução no domínio da frequência. Isto gera duas cópias do espectro do sinal de voz original, uma centrada em torno de  $w_p$  com um quarto de sua amplitude e outra



em torno do eixo central com meia amplitude. Esta última é o próprio sinal original com metade de sua potência.

- Os sistemas AM tem por características uma alta sensibilidade às interferências e ao *fading*, uma vez que uma mínima alteração em sua amplitude reflete, proporcionalmente, no sinal de voz demodulado na recepção.

---

### 3.2.2 - Modulação angular (PM / FM)

---

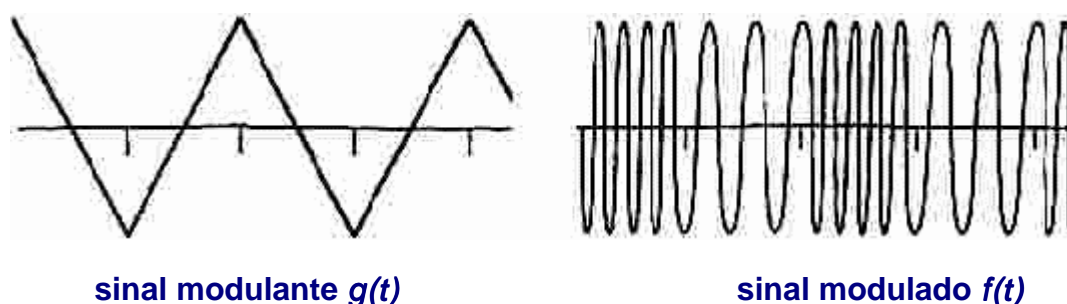
- O esquema de modulação angular pode ser feito pela modulação da fase da portadora, da frequência ou pela combinação destas, em relação ao sinal de modulante.
- A modulação em fase (PM) consiste em fazer com que a fase da onda senoidal portadora varie proporcionalmente à variação de amplitude de um sinal modulante. A portadora modulada em fase  $f_{PM}(t)$  é dado pela EQUAÇÃO 3.2 onde o sinal de voz  $g(t)$  representa as variações de fase da portadora  $h(t) = \cos(\omega_p \cdot t)$  com desvio angular máximo dado por  $k_p \cdot g(t)$ .

$$f_{PM}(t) = \cos[\omega_p \cdot t + k_p \cdot g(t)] \quad (3.2)$$

- A modulação em frequência (FM) altera a frequência da portadora na proporção da variação da amplitude do sinal de voz modulante. A portadora modulada em frequência  $f_{FM}(t)$  é dada pela EQUAÇÃO 3.3 com desvio de frequência máximo dado por  $k_p \cdot \int g(t) \cdot dt$ .

$$f_{FM}(t) = \cos[\omega_p \cdot t + k_p \cdot \int g(t) \cdot dt] \quad (3.3)$$

- A FIG. 3.4 mostra um exemplo de modulação da frequência de uma onda senoidal pelas variações de amplitude da onda dente-de-serra modulante.



**Figura 3.4 - Modulação em frequência do sinal dente-de-serra**

- É fácil notar que a amplitude da portadora não carrega nenhuma informação, pois esta é representada apenas pelas variações de frequência. Isto implica que se o sinal modulado tiver sofrido variações de amplitude devido à *fading* ao longo do percurso de propagação, isto não acarretará em grandes danos na demodulação da informação. Só importam as variações de frequência e estas não variam devido ao *fading*.
- Verifica-se que as modulações de fase e frequência se apresentam mais imunes aos ruídos, interferência e desvanecimentos do sinal propagado.
- O único desconforto desta técnica em relação ao AM é a grande largura de faixa destinada à transmissão da informação. Por exemplo, para um sinal modulante de 4 kHz de faixa, necessitamos de apenas 8 kHz de faixa utilizando AM, enquanto que se utilizarmos FM é necessária uma largura de faixa de aproximadamente 120 kHz se utilizarmos um desvio máximo de frequência de 60 kHz.

---

### 3.3 - Esquemas de modulação digital

---

- As técnicas de modulação digitais, assim como as analógicas, tem por objetivo transportar a informação de modo adequado ao meio e com eficiência de espectro.
- Destacaremos a seguir técnicas usadas para modular uma onda portadora cossenoidal em amplitude, frequência e fase, só que agora por um sinal digital binário.
- Apresentaremos também técnicas híbridas de modulação digital envolvendo variações de amplitude, frequência e/ou fase.

---

#### 3.3.1 - Modulação por chaveamento de amplitude (ASK)

---

- A *Amplitude Shift Keying* (ASK) consiste simplesmente em permitir ou não a transmissão da portadora em função da ocorrência ou não de *bits* 0 ou 1. Tomemos como exemplo a FIG. 3.5.

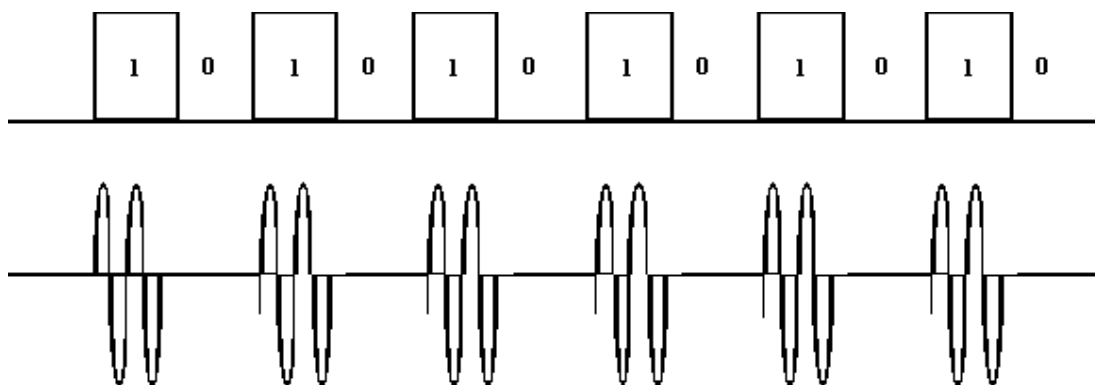


Figura 3.5 - Modulação ASK

---

### 3.3.2 - Modulação por chaveamento de frequência (FSK)

---

- A técnica de *Frequency Shift Keying* (FSK) comuta a frequência da portadora em dois valores fixos, a frequência nominal da portadora e outra pré-definida, isto em função do sinal digital binário de entrada. Vemos um exemplo na FIG. 3.6.

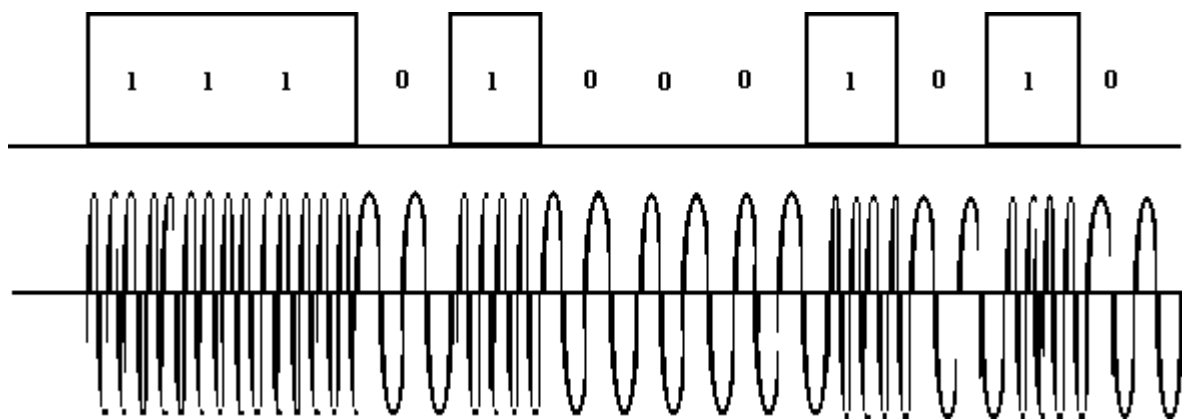


Figura 3.6 - Modulação FSK

---

### 3.3.3 - Modulação por chaveamento de fase (PSK)

---

- A modulação *Phase Shift Keying* (PSK), de modo similar ao FSK, consiste em variar a fase da portadora de acordo com a informação digital binária a ser transmitida. Vemos um exemplo na FIG. 3.7.

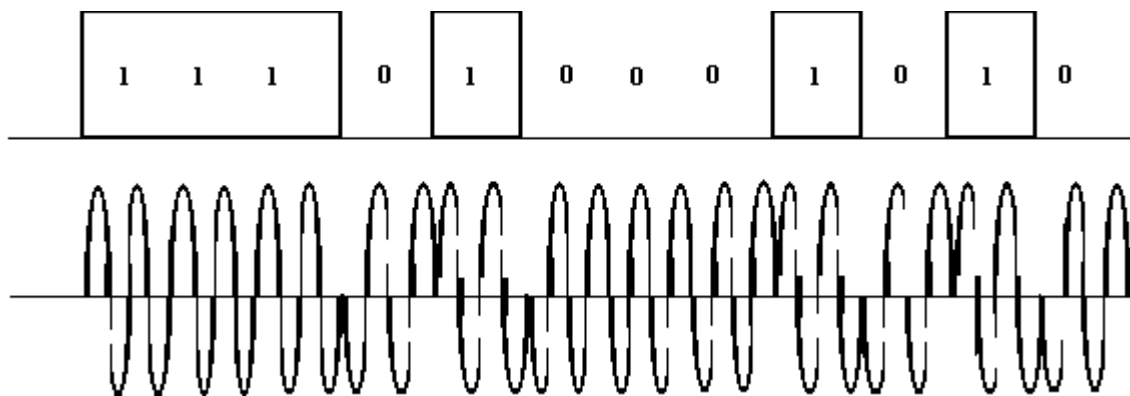


Figura 3.7 - Modulação PSK

### 3.3.4 - Modulação por chaveamento de fase diferencial (DPSK)

- O esquema *Differential Phase Shift Keying* (DPSK) é uma variação do PSK, onde há a inversão de  $180^\circ$  na fase da portadora sempre que ocorre o *bit* 0. Este esquema é também chamado de *Binary PSK* (BPSK). As alterações consecutivas em uma seqüência de *bits* 0 auxilia no sincronismo da comunicação.

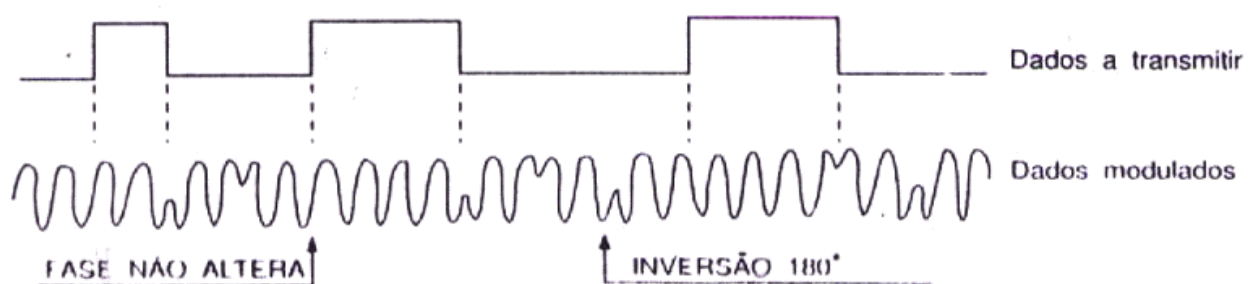


Figura 3.8 - Modulação DPSK

- O esquema de modulação DPSK possui variações em que se considera a unidade de informação como o conjunto de 2 (*Dibit*) ou até 3 *bits* (*Tribit*).

Desta forma, para cada variação da portadora, transmitem-se 2 ou 3 *bits*, dependendo do caso.

- No caso *Dibit* chamamos o esquema de DPSK-4, uma vez que dois *bits* definem 4 possíveis estados. Neste caso, cada estado é representado por uma alteração no ângulo da portadora múltipla de  $90^\circ$  conforme mostra o QUADRO 3.1.

<i>Dibit</i>	Variação de fase	
	Padrão A	Padrão B
00	$0^\circ$	$45^\circ$
01	$90^\circ$	$135^\circ$
11	$180^\circ$	$225^\circ$
10	$270^\circ$	$315^\circ$

Quadro 3.1 - Modulação DPSK-4

- No caso de DPSK-4 a unidade de informação é o *Tribit* onde para cada conjunto de 3 *bits* fazemos uma variação de fase múltipla de  $45^\circ$  conforme mostra o QUADRO 3.2.

<b>Tribit</b>	<b>Variação de fase</b>
001	0°
000	45°
010	90°
011	135°
111	180°
110	225°
100	270°
101	315°

**Quadro 3.2 - Modulação DPSK-8**

---

### 3.3.5 - Modulação por chaveamento de fase e quadratura (QPSK)

---

- A *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) é uma variação do PSK onde dois sinais BPSK são transmitidos defasados de 180°. Isto duplica a quantidade de informação transmitida. Podemos verificar na FIG. 3.9 que a variação de fase resultante da combinação das componentes em fase e em quadratura a ser aplicada na portadora dependerá de cada *dibit* a ser transmitido. Como as variações de fase são múltiplas de  $\pi/4$  define-se este esquema como  $\pi/4$ -QPSK. Este esquema está regulamentado através da norma CCITT V26-B.

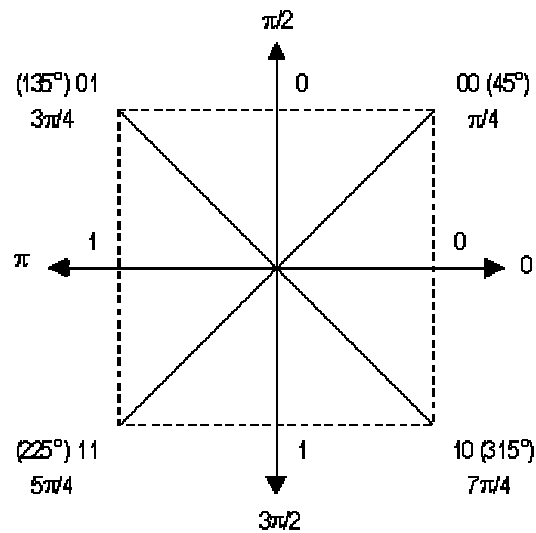


Figura 3.9 - Modulação QPSK

- Observe que a amplitude de um sinal QPSK é idealmente constante, mas quando há uma transição de 10 para 01, por exemplo, o sinal passa por 0 mesmo que momentaneamente. Para resolver este caso estudaremos o DQPSK a seguir.

### 3.3.6 - Modulação por chaveamento de fase em quadratura diferencial (DQPSK)

- O esquema *Differential Quadrature Phase Shift Keying* (DQPSK) aproveita a característica de sincronismo da transmissão do DPSK e aplica ao QPSK. Este esquema resolve também o problema de portadora com amplitude zero em determinadas transições.
- No DQPSK as transições dos 2 *bits* do *dibit* ocorrem instantes de tempo defasados de meio *bit*. Isto faz com que apenas um dos *bits* do *dibit* sofra alteração implicando que a variação de fase máxima deste *bit* seja de  $\pi/2$ , elimi-



nando assim as transições de  $\pi$  radianos. Isto elimina qualquer possibilidade da portadora passar pela amplitude zero como vemos na FIG. 3.10. O  $\pi/4$ -DQPSK a 48,8 kbps é o esquema escolhido para o sistema TDMA.

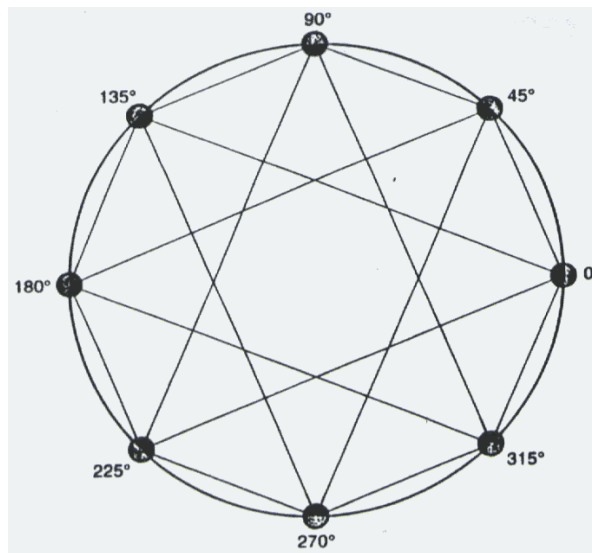


Figura 3.10 - Modulação  $\pi/4$ -DQPSK

---

### 3.3.7 - Modulação por amplitude em quadratura (QAM)

---

- O esquema *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) é uma combinação dos esquemas ASK e PSK modificando simultaneamente a amplitude e fase da portadora, por isto também é conhecida como AMPSK. O QUADRO 3.3 mostra valores de amplitude e fase da portadora para uma situação de *Quadribit*.

Quadribit				Desvio de fase	Amplitude
0	0	0	1	0°	3
0	0	0	0	45°	$\sqrt{2}$
0	0	1	0	90°	3
0	0	1	1	135°	$\sqrt{2}$
0	1	1	1	180°	3
0	1	1	0	225°	$\sqrt{2}$
0	1	0	0	270°	3
0	1	0	1	315°	$\sqrt{2}$
1	1	0	1	315°	$3\sqrt{2}$
1	1	0	0	270°	5
1	1	1	0	225°	$3\sqrt{2}$
1	1	1	1	180°	5
1	0	1	1	135°	$3\sqrt{2}$
1	0	1	0	90°	5
1	0	0	0	45°	$3\sqrt{2}$
1	0	0	1	0°	5

**Quadro 3.3 - Modulação QAM (Quadribit)**

### 3.4 - Técnicas de codificação de voz

- A necessidade de compressão do sinal de voz nos sistemas de comunicações móveis se deve à limitação do espectro disponível e a sua melhor utilização. As técnicas de processamento digital da voz permitem a compressão, o que reduz sensivelmente as taxas de transmissão e, por conseguinte, a largura do canal de voz.
- Na escolha de um sistemas de codificação da voz deve-se levar em conta a complexidade algorítmica do codificador, a compatibilidade entre sistemas, a

qualidade da voz recebida e a resposta à presença de erros na transmissão. A imunidade a erros de transmissão é fator determinante na escolha de uma tecnologia onde o sinal de rádio móvel está sujeito ao desvanecimento de curto prazo.

- Assim, a escolha do esquema codificador adequado levará ao melhor aproveitamento do espectro disponível pela redução das taxas de transmissão. Dentre estes esquemas aqueles que se utilizam da predição aproveitam os aspectos redundantes da voz humana, como padrões de onda que se repetem em determinados fonemas. O objetivo final reside tanto na transmissão da voz com qualidade e com eficiência de espectro.

---

### 3.4.1 - Processamento digital do sinal de voz

---

- As técnicas de processamento digital do sinal de voz fundamentam-se na transmissão de sinais discretos no tempo, através da codificação binária do sinal analógico da voz humana.
- O **Teorema da Amostragem**, comprovado por Nyquist e Küpfmüller em 1924 [1], mostra que um sinal é corretamente recuperado a partir de amostras deste sinal tomadas em intervalos adequados de frequência, o que chamamos de Modulação por Amplitude de Pulso (PAM).
- Assim, um sinal  $g(t)$  limitado em faixa e que não tenha nenhuma componente espectral acima da frequência  $w_m$ , será univocamente determinado, podendo ser recuperado através de suas amostras tomadas a uma frequência superior a  $2w_m$ .

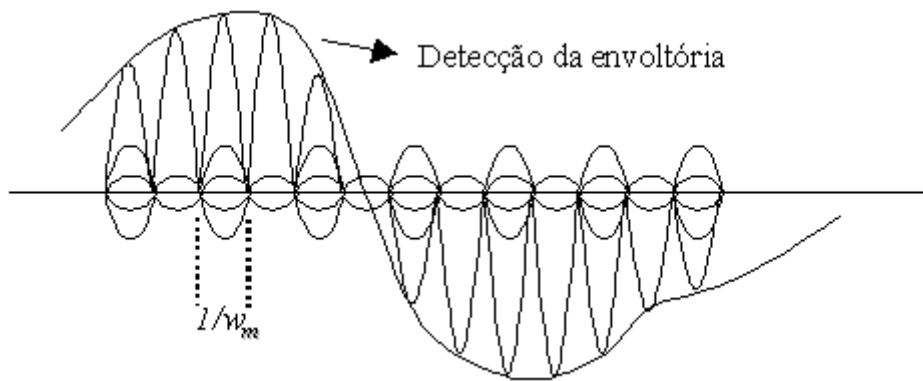


Figura 3.11 - Recuperação do sinal amostrado

- Os sinais amostrados têm suas amostras quantizadas em níveis de amplitude e estes níveis são codificados em representação binária, como descrito por Cattermole em [2].

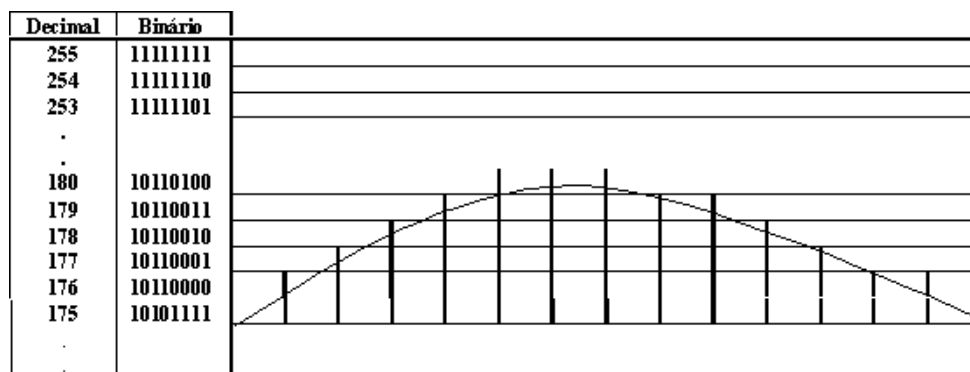
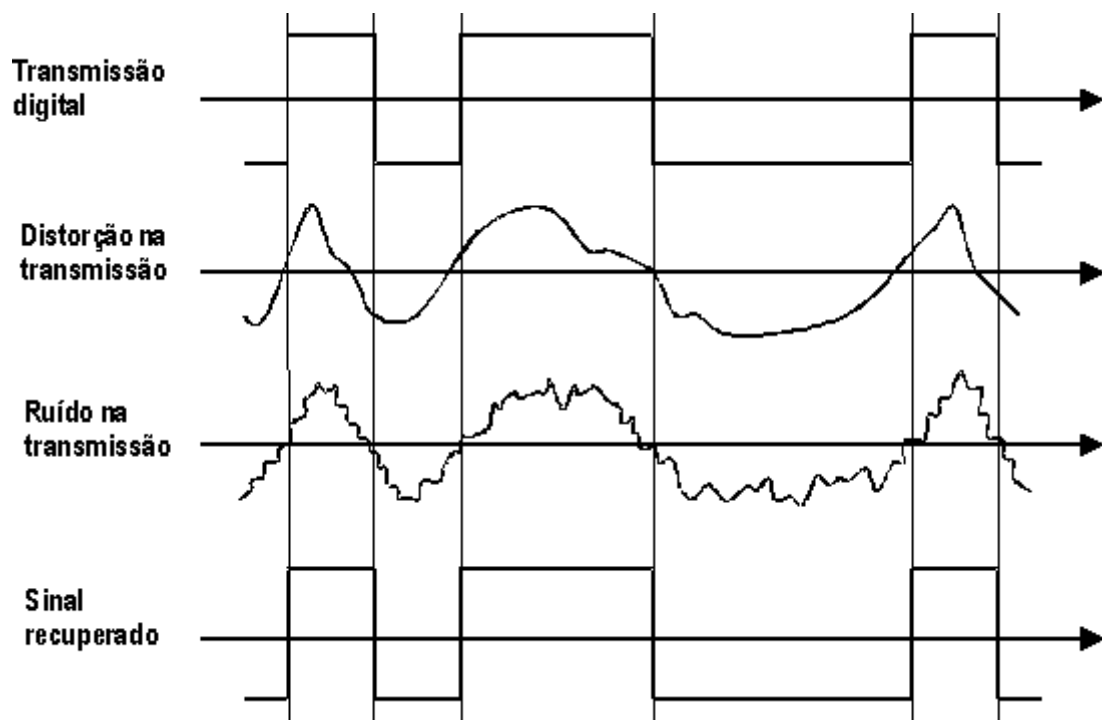


Figura 3.12 - Quantização e codificação das amostras de um sinal

- Enquanto um sinal analógico tem restrições de transmissão devido ao *fading*, o sinal codificado é devidamente recuperado mesmo na presença de ruído. Assim a imunidade ao ruído consiste na principal característica das técnicas de modulação digital.

- Um sistema tratando a informação em forma digital tem facilitada a sua manipulação e a correção dos erros de transmissão. O único inconveniente é que as modulações digitais necessitam uma maior largura de faixa em relação às analógicas, no entanto, esta desvantagem é utilizada para compensar as interferências na transmissão como vemos na FIG. 3.13.



**Figura 3.13 - Características de imunidade na transmissão digital**

- Existem hoje diversas técnicas de processamento digital da voz, como as classificadas na FIG. 3.14. Apresentaremos algumas delas nesse Capítulo.

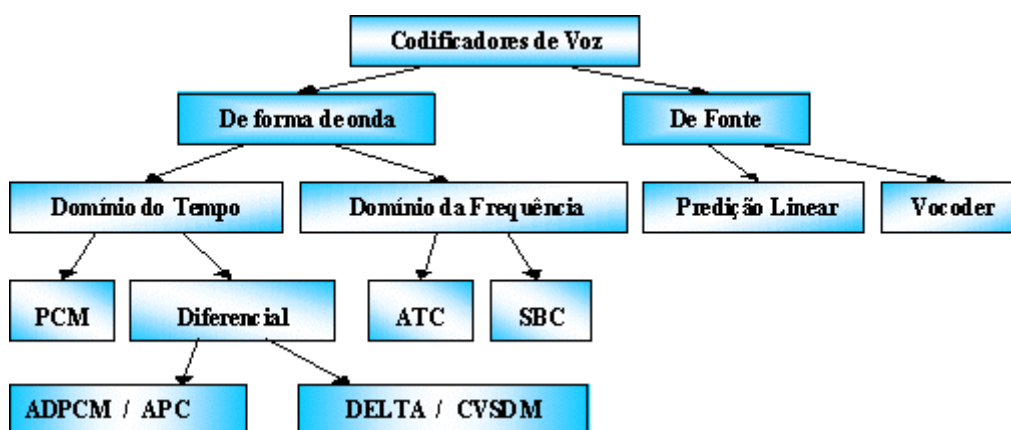


Figura 3.14 - Codificadores de voz

### 3.4.2 - Modulação por codificação de pulso (PCM)

- O esquema *Pulse Code Modulation* (PCM) consiste na amostragem do sinal analógico pela modulação PAM, a quantização destas amostras por um processo de mapeamento da amplitude das amostras do sinal em um conjunto finito de valores discretos e a codificação de cada amostra quantizada em uma representação binária pura capaz de representar todos as possíveis amplitudes das amostras do sinal analógico.
- Durante o processo de quantização podemos fazer uso da compressão que consiste na execução da quantização de forma não linear diminuindo o efeito do ruído de quantização nas baixas amplitudes e diminuindo a relação sinal/ruído. O CCITT aprovou a chamada curva característica da "*Lei A*" aproximada por segmentos proporcionais à codificação por 13 bits do sinal de entrada e 8 bits para o sinal de saída. Foi aprovada também a "*Lei M*".

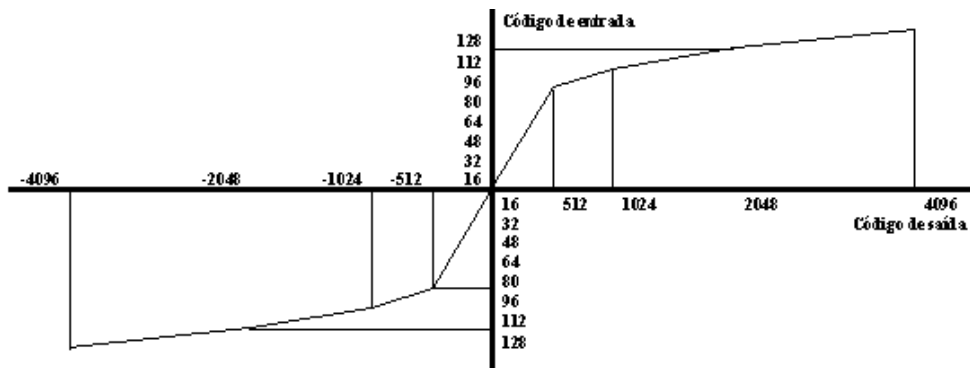


Figura 3.15 - Curva de compressão – Lei A

- O sinal PCM é codificado em *No Return to Zero* (NRZ) para tráfego em linha e, posteriormente, codificado para transmissão em *Return to Zero* (RZ) *Alternate Mark Inversion* (AMI) como mostrados na FIG. 3.16.

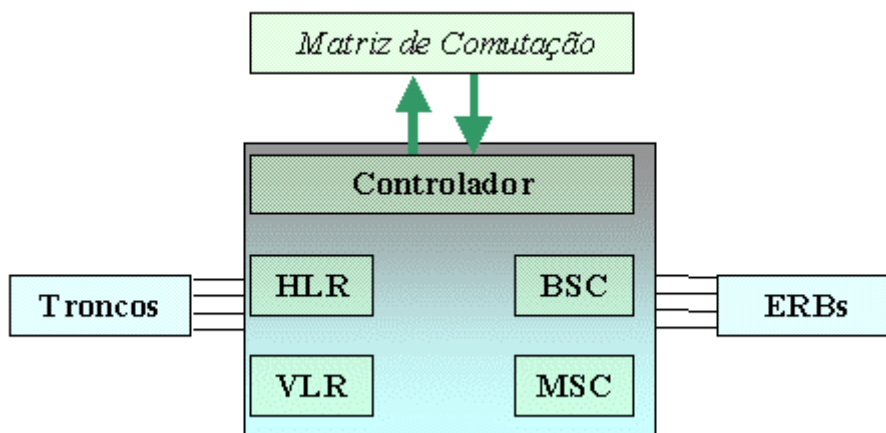


Figura 3.16 - Codificação de canal

- O esquema de um sistema de comunicação PCM é bem representado pela FIG. 3.17.

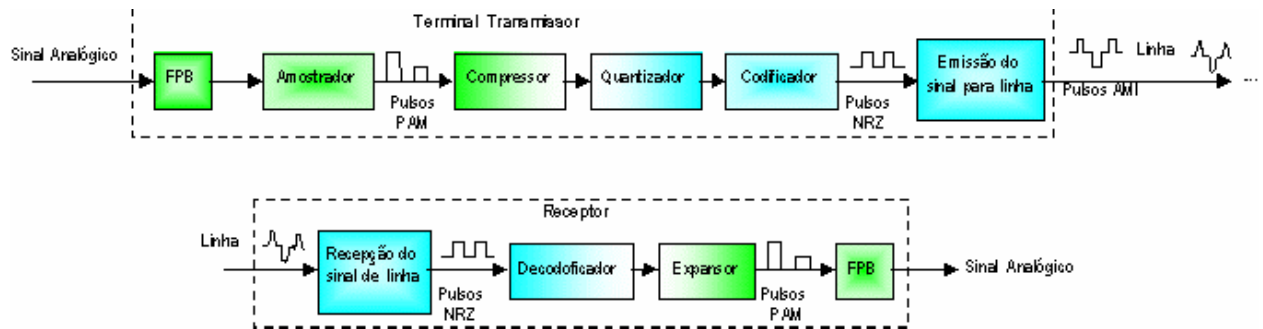


Figura 3.17 - Sistema digital baseado em PCM

### 3.4.3 - Modulação diferencial por codificação de pulso (DPCM)

1. O *Differential Pulse Code Modulation* (DPCM) se difere do PCM por analisar somente a diferença entre as amostras sucessivas. Isto implica em um número menor de níveis de quantização. Esta técnica consiste em utilizar um preditor linear como o da FIG. 3.18.

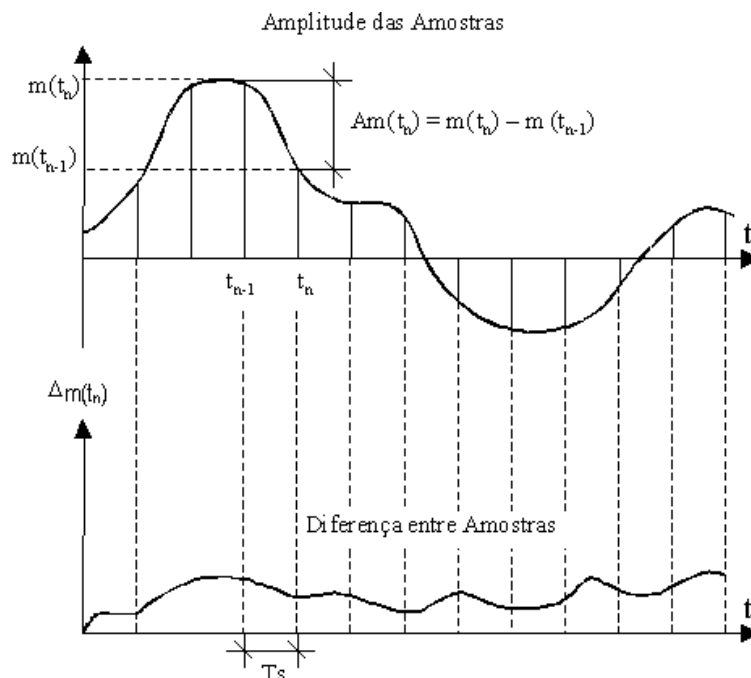


Figura 3.18 - Predição linear – DPCM



### 3.4.4 - Modulação delta

- A *Delta Modulation* (DM) consiste em comparar o sinal de voz com um sinal de referência que é o próprio sinal atrasado, se a amostra atual é maior que a imediatamente anterior é enviado a informação de incremento, caso contrário, é enviada a informação de decremento como mostrado na FIG. 3.19.

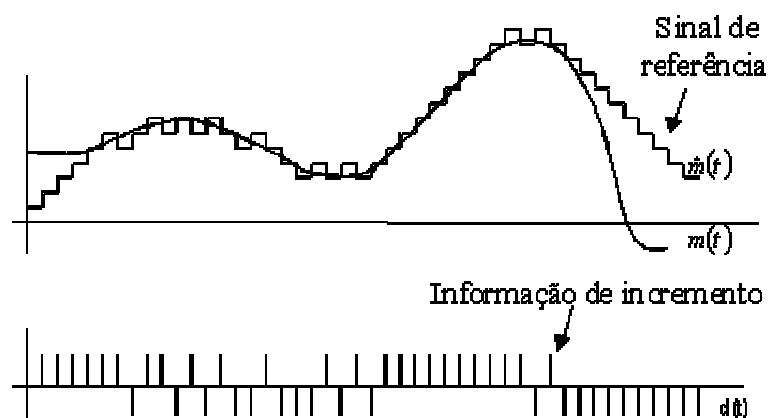


Figura 3.19 - Modulação delta

### 3.4.5 - Codificação por sub-banda (SBC)

- O *Sub-Band Coding* (SBC) consiste em dividir a voz em 4 ou 8 sub-bandas por uma série de filtros passa-faixa onde cada sub-banda é amostrada e codificada. Assim, faz-se uma translação do sinal em sub-banda para a frequência zero por uma modulação em banda lateral única *Single Sideband Modulation* (SSB).
- Esta operação de translação facilita a redução da taxa de amostragem. Um exemplo é mostrado no QUADRO 3.4 onde o sinal de voz é particionado em 4 sub-bandas, através do uso de filtros passa-faixa.

Sub-banda	Limites da faixa (Hz)	Nº de bits de codificação
1	225 – 450	4
2	450 – 900	3
3	1000 – 1500	2
4	1800 – 2700	1

**Quadro 3.4 - Definição das sub-bandas – SBC**

- Dado as 4 sub-bandas, para uma perfeita reconstrução dos sinais, essas sub-bandas precisam ser amostradas a uma taxa duas vezes a largura de banda do sinal (Teorema da Amostragem), ou seja:
  - **Sub-banda 1** =  $2 \times (450-225) = 450$  amostras/segundo.
  - **Sub-banda 2** =  $2 \times (900-450) = 900$  amostras/segundo.
  - **Sub-banda 3** =  $2 \times (1500-1000) = 1000$  amostras/segundo.
  - **Sub-banda 4** =  $2 \times (2700-1800) = 1800$  amostras/segundo.
- Logo, a taxa total de codificação será:
  - $(450 \times 4 \text{ bits}) + (900 \times 3 \text{ bits}) + (1000 \times 2 \text{ bits}) + (1800 \times 1 \text{ bit}) = 8,3 \text{ kbps}$

---

### 3.4.6 - Codificação por transformação adaptativa (ATC)

---

- O *Adaptive Transform Coding* (ATC) é uma técnica capaz de reduzir a codificação da voz para taxas de 9,6 a 20 kbps.
- Nesta técnica, a voz é segmentada em sua forma de onda e cada um desses segmentos é representado por um conjunto de coeficientes. Estes coeficientes são então quantizados, codificados e transmitidos.
- O número de *bits* para a codificação de cada coeficiente é proporcional ao sua magnitude.

---

## 3.5 - Vocoders

---

- Os *vocoders* são sistemas de codificação de voz que, a partir da quantificação de parâmetros extraídos do sinal na transmissão, sintetizam a voz no receptor.
- Estes sistemas são bem mais complexos que os codificadores vistos anteriormente, uma vez que tentam prever o sinal de voz a ser codificado, mas garantem taxas de transmissão bem menores.
- Os *vocoders* analisam uma seqüência de amostras de voz para derivar um padrão conhecido de geração da voz humana. Os parâmetros analisados pelos *vocoders* são o *Pitch*, o Ganho e a classificação *Voiced* ou *Unvoiced* do som.
- Os sons *voiced* são um resultado de vibrações quase periódicas como os fonemas *m*, *n* e *v*. Os sons *unvoiced* são produzidos por turbulências do fluxo

de ar na cavidade bucal através de constrição como em *s*, *f* e *sh*. Assim, pelo ajuste preciso desses parâmetros obtemos uma boa qualidade de sintetização da voz na recepção.

- Apresentamos a seguir alguns tipos de *vocoders*.

---

### 3.5.1 - Vocoder por predição linear (LPC)

---

- Os *Linear Predictive Coders* (Vocoders LPC) utilizam a mesma predição do ADPCM, só que ao invés de transmitir informação da diferença entre amostras subseqüentes, o LPC transmite somente algumas características desta diferença como o *Pitch*, o Ganho e a classificação *voiced* ou *unvoiced* do som.
- O sintetizador na recepção é um filtro preditor que faz o que se chama de *Vocal Tract* da forma de onda de excitação. Este processo simula as ações dos pulmões e acordes vocais para os níveis de frequência em função dos parâmetros analisados na transmissão.
- Esta técnica pode acrescentar algum zumbido na voz sintetizada em decorrência da diferença de fase entre as componentes harmônicas.

---

### 3.5.2 - Vocoder por multi-pulsos (MPE/LPC)

---

- O *Multi-Pulse Excited Vocoders* (MPE/LPC) acrescenta ao sistema LPC mais de um pulso no processo de excitação com o ajuste das posições e amplitudes dos pulsos individuais. Isto minimiza o erro quadrático médio evitando o zumbido do LPC, ou seja, promove melhor qualidade de voz.

---

### 3.5.3 - Vocoder por excitação de código (CELP)

---

- O *Code-Excited* LPC (CELP) escolhe a melhor combinação de um conjunto de códigos de sinais aleatórios para representar cada amostra de voz. Apenas o índice do registro destes códigos é transmitido representando as amostras do sinal de excitação na recepção.
- O sinal é sintetizado ainda no transmissor e as amostras de voz regeneradas são comparadas com as amostras do sinal original; obtém-se então a diferença. Esta diferença passa por filtros que amplificam as frequências mais significativas e atenuam as menos significativas.
- O CELP requer mais de meio milhão de operações por segundo, podendo prover alta qualidade. Este padrão é utilizado no sistema TDMA (US-136) comprimindo a informação de voz à taxa de 8 kbps. O padrão celular digital CDMA (IS-95) utiliza o QCELP com uma taxa de 8 a 14,4 kbps.
- O *Vector-sum* CELP (VSELP) é uma variação do CELP usado no sistema D-AMPS (IS-54) aumentando a capacidade do AMPS em 3 vezes com um codificador de voz de 8 kbps.

---

### 3.5.4 - Vocoder por excitação residual (RELPC)

---

- Os *Residual Excited* LPC (RELPC) utiliza o mesmo modelo de coeficientes do LPC e seus parâmetros de excitação para um bloco do sinal de voz. Este bloco processado é sintetizado ainda no transmissor e comparado com o sinal original gerando uma diferença.

- Esta diferença é quantizada, codificada e transmitida junto com os parâmetros LPC. A diferença é utilizada no receptor para sintetizar uma melhor aproximação do sinal original.

---

### 3.6 - Cyclic redundancy check (CRC)

---

- O *Cyclic Redundancy Check* (CRC) é um método de checagem de erros utilizando um esquema de paridade combinada. Este esquema previne a não de detecção de um número par de erros como pode acontecer se utilizarmos apenas ao *bit* de paridade.
- Podemos ver no exemplo a seguir o funcionamento deste esquema. Seja a seqüência 10111011 a ser transmitida. Seja o polinômio gerador  $G(x)=x^3+x^2+x$ . Podemos representar os *bits* a serem transmitidos pelo seguinte polinômio:

$$D(x)=1.x^7+0.x^6+1.x^5+1.x^4+1.x^3+0.x^2+1.x^1+1.x^0 = x^7+x^5+x^4+x^3+x+1$$

- Agora multiplicamos  $D(x)$  pelo termo de maior grau de  $G(x)$ , ou seja,

$$D'(x) = x^7.D(x) = x^{10}+x^8+x^7+x^6+x^4+x^3$$

- Agora efetuamos a divisão polinomial de  $D'(x)$  por  $G(x)$ . Desta operação obtemos o resto.

$$R(x) = x^2+x \text{ (110)}$$

- Este resto é transmitido na seqüência da informação  $D(x)$  na forma 10111011110.
- Na recepção esta seqüência é novamente dividida por  $G(x)$ .

- Finalmente a recepção é considerada bem sucedida se o resto desta divisão for igual a zero.
- Apresentamos a seguir três polinômios geradores muito utilizados.

Padrão	Polinômio Gerador	Eficácia
CRC-12	$x^{12} + x^{11} + x^3 + x^2 + x + 1$	Até 12 erros
CRC-CCITT-V.41	$x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$	Até 16 erros
CRC-16	$x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$	Até 16 erros

Quadro 3.5 - Polinômios geradores de CRC.

### 3.7 - Interleaving

- A técnica de *Interleaving* faz o entrelaçamento de *bits* a serem transmitidos para reduzir os efeitos de desvanecimento prolongado do sinal durante a propagação no ambiente de rádio móvel.
- Este ordenamento entrelaçado dos *bits* que carregam a informação codificada visa proteger de erros eventuais na propagação, isto porque as técnicas de correção de erros são eficientes apenas quando os erros de transmissão ocorrem aleatoriamente.
- O equipamento entrelaçador embaralha a ordem dos *bits* gerados pelo codificador do sinal antes de sua transmissão. O receptor faz o processo inverso para reaver os *bits* na sua seqüência original.
- Tomemos o seguinte exemplo. Desejamos transmitir a seguinte seqüência de caracteres:

**AQUELE\_HOMEM\_QUE\_PISOU\_NA\_LUA\_EM\_69**

- Suponha que durante a transmissão deste sinal houve um desvanecimento por um período de tempo que afetou esta seqüência de 35 símbolos. Tendo sido os símbolos das posições de 11 a 15 afetados, teríamos na recepção a seguinte seqüência:

**AQUELE\_HOMHWYALE\_PISOU\_NA\_LUA\_EM\_69**

- Agora observe se embaralharmos os símbolos do sinal original por uma matriz 5x7.

<i>A</i>	<i>Q</i>	<i>U</i>	<i>E</i>	<i>L</i>	<i>E</i>	<i>_</i>
<i>H</i>	<i>O</i>	<i>M</i>	<i>E</i>	<i>M</i>	<i>_</i>	<i>Q</i>
<i>U</i>	<i>E</i>	<i>_</i>	<i>P</i>	<i>I</i>	<i>S</i>	<i>O</i>
<i>U</i>	<i>_</i>	<i>N</i>	<i>A</i>	<i>_</i>	<i>L</i>	<i>U</i>
<i>A</i>	<i>_</i>	<i>E</i>	<i>M</i>	<i>_</i>	<i>6</i>	<i>9</i>

- Agora transmitimos a seguinte seqüência a partir das colunas, linha a linha:

**AHUUAQOE\_UM\_NEEEPAMLMI\_E\_SL6\_QOU9**

- Novamente considerando os erros nas posições dos símbolos de 11 a 15 receberíamos:

**AHUUAQOE\_UHWYALEEPAMLMI\_E\_SL6\_QOU9**

- Na recepção a matriz 5x7 seria a seguinte:



A	Q	H	E	L	E	_
H	O	W	E	M	_	Q
U	E	Y	P	I	S	O
U	_	A	A	_	L	U
A	_	L	M	_	6	9

- Finalmente, após o processo de desembaralhamento teríamos a seguinte sequência:

**AQHELE\_HOWEM\_QUEYPISOU\_AA\_LUA\_LM\_69**

- Verifique que o *Interleaving* dispersa os erros pelo quadro cabendo agora aos códigos corretores de erro sua correção.
- Os sistemas baseados em TDMA fazem uso do *Interleaving* sobre dois *slots* adjacentes do sinal de voz de um usuário. Cada *slot* passa então a conter a metade de dados de cada *slot* original. A matriz utilizada tem dimensões de  $26 \times 10$ . Os dados são inseridos nas colunas, sendo que a cada linha é inserido a informação de um dos dois quadros alternados.

---

## Capítulo 4 - Aspectos de projeto do sistema

---

*Este Capítulo tem por objetivo apresentar ao leitor alguns parâmetros importantes para o planejamento dos sistemas de comunicação móvel celular. São levantados aspectos de transmissão e propagação do sinal de rádio móvel, a administração do espectro, tráfego e características de antenas.*

---

### 4.1 - Aspectos de projeto do sistema

---

- O projeto de sistemas celulares envolve aspectos como definição do padrão de reuso, interferência co-canal, limiar da relação sinal/ruído aceitável, previsão de tráfego na Hora de Maior Movimento (HMM) por região, a distribuição geográfica dos usuários, dentre outros que podem ser analisados separadamente e depois relacionados entre si. Outros aspectos estão fora do controle do projetista e são estudados como estratégia de implementação.
- O projeto de um sistema pode ser dirigido pela tecnologia. Desta forma, as características do sistema são ditadas pela tecnologia e equipamentos disponíveis no mercado. Isto traz a grande vantagem de um cronograma de implementação curto. Por outro lado, o usuário deve adaptar suas necessidades aos equipamentos existentes.
- Em uma outra abordagem, o projeto dirigido pelas aplicações busca o atendimento das necessidades do usuário. As atenções estão voltadas para o grau de serviço (GOS) esperado, a qualidade de serviço (QoS) contratada, o tipo de informação a ser trafegada, a largura de faixa disponível ao usuário, a privacidade na comunicação, as características do tráfego da informação (velocidade, duração, atraso), etc.. Isto tudo pode até sair barato se o usuário estiver disposto a pagar pelo serviço.

- Para fins de custo procura-se projetar um dos sistemas celulares com a quantidade mínima de ERB cobrindo a área definida, GOS e qualidade compatíveis com o anseio do usuário. Deve-se considerar que as áreas de maior tráfego devem ter maior atenção no projeto. Os parâmetros como área efetivamente coberta, GOS, grau de mobilidade e qualidade do sinal recebido são conceitos relevantes quando a satisfação do usuário é o fim.
- O planejamento de um sistema começa pela definição da área de serviço a ser atendida a partir da distribuição geográfica do tráfego a ser atendido. Em seguida, em ambiente computacional de simulação, localiza-se a primeira ERB. A partir de um plano de reuso, localiza-se as outras ERB em função do tráfego oferecido por cada ERB. Todo sistemas deve ser projetado para permitir expansões tanto em área atendida como em tráfego oferecido.
- O ambiente computacional faz a predição de cobertura celular e detecta as possíveis condições de interferências co-canal. A partir deste resultado o projetista rearranja as ERB de modo a evitar as condições de interferência. Após nova predição a equipe de projeto começa os levantamentos em campo. Observando-se a coerência no projeto inicia-se a implantação do sistema.
- Os passos descritos formam uma linha geral de projeto de sistema de comunicação móvel celular. Detalhamos a seguir alguns estudos que integram estes passos.

---

#### 4.1.1 - Volume de Tráfego

---

- O objetivo de qualquer empresa é sempre o lucro. Sendo o lucro o maior possível, melhor ainda. Assim, o projetista deve iniciar seus estudos pela estimação do volume e perfil do tráfego na região de concessão para a exploração do serviço de comunicação móvel celular.

- Um grupo responsável pela pesquisa de mercado deve apresentar informações precisas sobre a distribuição do tráfego na região, incluindo estudos em Hora de Maior Movimento.
- Estes estudos podem ser apresentados, por exemplo, em forma de mapa geográfico, apresentando a região estudada dividida em quadrículas, cada qual contendo sua respectiva densidade de tráfego média e/ou em HMM. Sempre vale lembrar que a HMM em certa quadrícula pode não coincidir com a HMM do sistema. Para o projeto de áreas urbanas utiliza-se quadrículas em torno dos 4 km<sup>2</sup> área.

0	0	1	2	1	1	1	0	0
0	1	2	3	2	2	1	1	0
1	2	4	5	5	4	3	1	1
1	3	4	5	5	4	2	1	0
1	2	4	4	4	3	2	2	0
1	2	3	3	3	2	3	2	1
0	0	0	1	1	2	0	1	0

Figura 4.1 - Levantamento local do volume e perfil do tráfego

- Outro procedimento importante é associar às quadrículas o seu fator de mobilidade, da ordem de 8% a 20%. Observe que, mesmo em termos de mobilidade, as células centrais apresentam HMM diferente que as células periféricas.

---

### 4.1.2 - Área de serviço

---

- A definição da área geográfica que será atendida pelo serviço de comunicação móvel celular leva em consideração tanto o volume de tráfego a ser atendido quanto a relevância de atender regiões com baixo volume de tráfego. Restringir a área de serviço a regiões com alto volume de tráfego pode trazer insatisfação aos assinantes do serviço por considerarem este com pouca mobilidade.
- Se por um lado as áreas de serviço extensas oferecem grande mobilidade aos usuários, por outro, quanto maior a área, maior a quantidade de estações a serem utilizadas, mais caro fica a implantação do sistema. Daí a importância de obter informações sobre perfil do assinante.
- A determinação do número de ERB necessárias ao sistema depende, além da definição da área de serviço, também do número máximo canais por ERB e das condições de propagação do sinal de rádio móvel nas determinadas regiões do sistema.

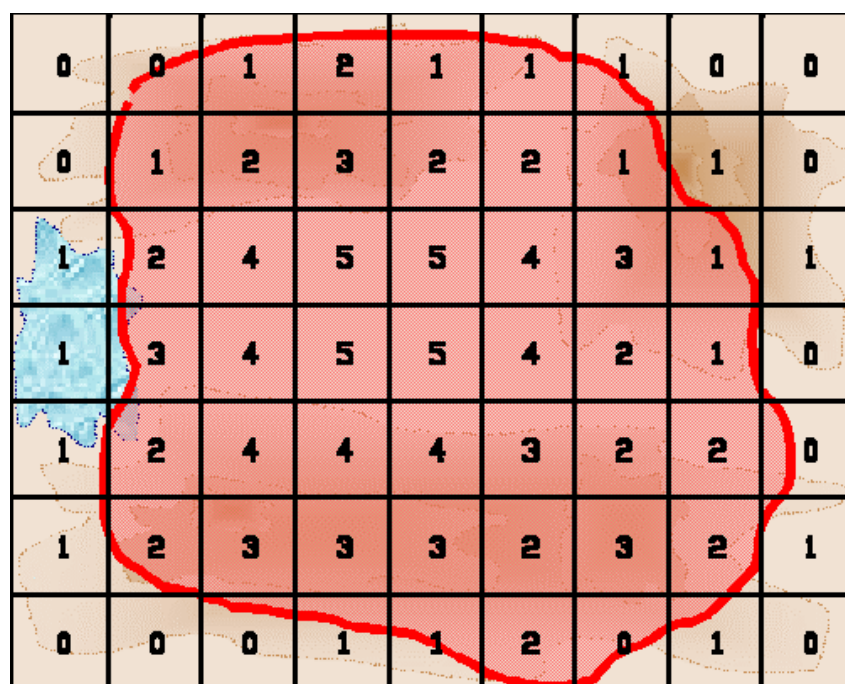


Figura 4.2 - Definição da área de serviço do sistema

### 4.1.3 - Primeira ERB

- Para os primeiros estudos de projeto do sistema são utilizadas plataformas computacionais tanto para análise de tráfego como para a predição de cobertura celular. O primeiro passo para estes estudos é a localização da primeira ERB na região de maior importância, seja pelo volume de tráfego médio ou na HMM. Também deve ser levada em consideração a disponibilidade de terrenos, infra-estrutura, Lei Municipal de Uso do Solo, plano urbanístico da cidade, etc..
- A definição do raio da célula é feita levando em consideração a disponibilidade de canais para a ERB e o ambiente de propagação do sinal de rádio móvel. Quanto maior o raio da célula, maior será o tráfego a ser atendido, maior o número de canais por ERB. Por outro lado, para um dado ambiente, um

maior raio é atingido através de maior potência na transmissão, o que pode onerar o sistema. Além do que, as imperfeições no terreno podem deformar a célula englobando outras regiões do sistema, portanto mais volume de tráfego.

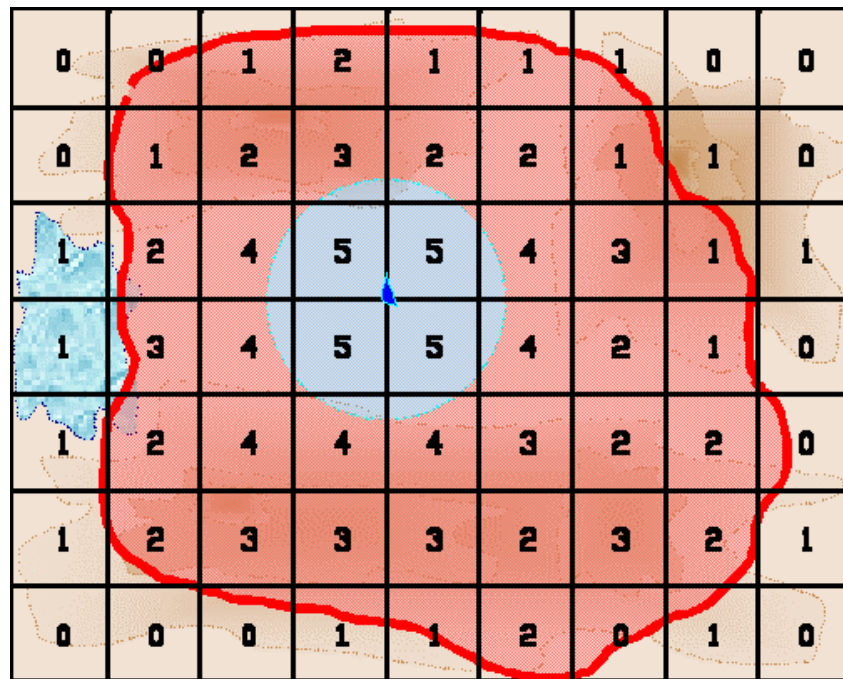


Figura 4.3 - Posicionamento da primeira ERB

#### 4.1.4 - Padrão de reuso

- O padrão de reuso  $N$  a ser adotado deve levar em consideração a interferência, o tráfego a ser atendido por cada célula e, principalmente, a possibilidade de expansão do sistema.
- Do Capítulo 2 lembramos que quanto menor o padrão de reuso  $N$ , menor será a relação  $D/R$  implicando em pior qualidade do sinal devido à interferência co-canal. Por outro lado, maior será a quantidade de tráfego oferecido por célula, pois terá mais canais.



- Um boa idéia é dar início a um sistema com padrão de reuso mais elevado, com menor tráfego oferecido por célula. Quando necessário, basta alterar para um padrão de reuso menor apenas por realocar os canais nas ERB já existentes. Teremos assim um maior número de canais por ERB.

### 4.1.5 - Localização das ERB

- Até agora já temos definidos o padrão de reuso  $N$  e a posição da primeira ERB. Neste ponto o projetista busca atender às regiões de maior tráfego em torno da célula da primeira ERB. A localização destas novas ERB, com células de mesmo raio da primeira, em torno da original deve contemplar o padrão de reuso escolhido, ou seja, deve-se posicionar  $N$  ERB em torno da primeira.
- Podem ser definidas células de tamanhos maiores para cobrir regiões com menor volume de tráfego. O investimento em potência é bem mais razoável que ter mais ERB na região.

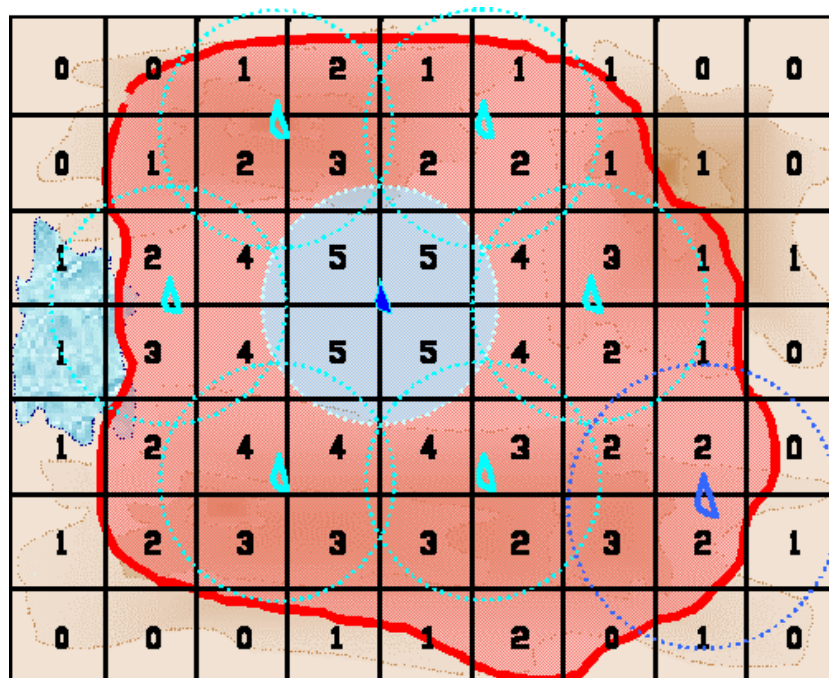


Figura 4.4 - Localização das ERB



### 4.1.6 - Predição de cobertura

- A partir das definições de localização das ERB, do raio das células e do perfil do terreno, o projetista utiliza modelos de propagação do sinal de rádio móvel no dado ambiente e, através de métodos de predição de cobertura celular, estima a área realmente coberta por cada ERB. Nossa abordagem inicial na morfologia da célula, seja circular ou hexagonal, é então modificada pelas simulações computacionais.

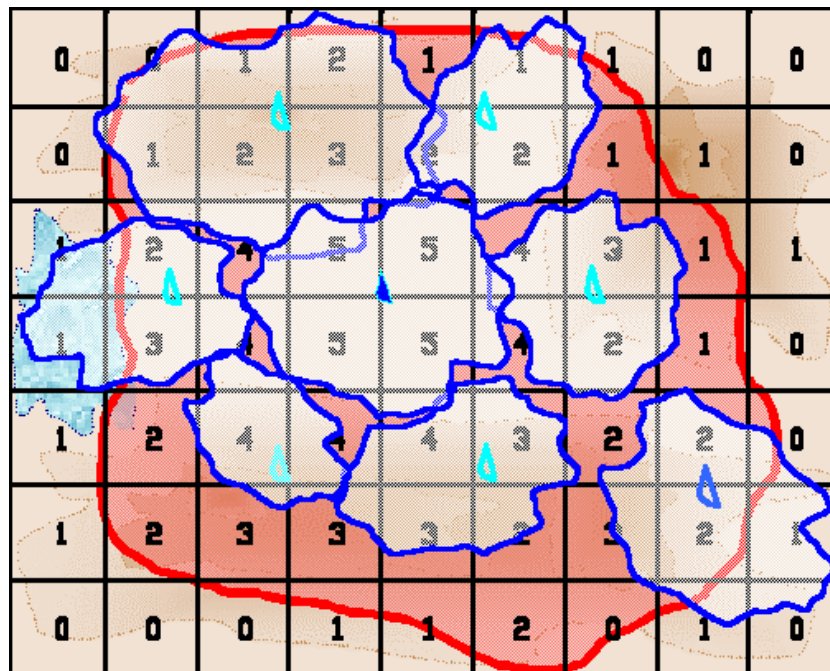


Figura 4.5 - Predição de cobertura

### 4.1.7 - Reavaliação do projeto

- Os resultados obtidos da plataforma de predição dão uma primeira impressão no resultado do projeto. A partir destes resultados o projetista pode reavaliar

tanto a posição das ERB quanto o raio de suas células. Devem ser observados as sombras de cobertura e regiões com maior incidência de interferência co-canal.

- A célula pode ser totalmente remodelada por técnicas de setorização celular com antenas direcionais. Isto ajusta os setores para que atendam a área a ser coberta. Ajustes de altura de antena e potência de transmissão também são utilizados.

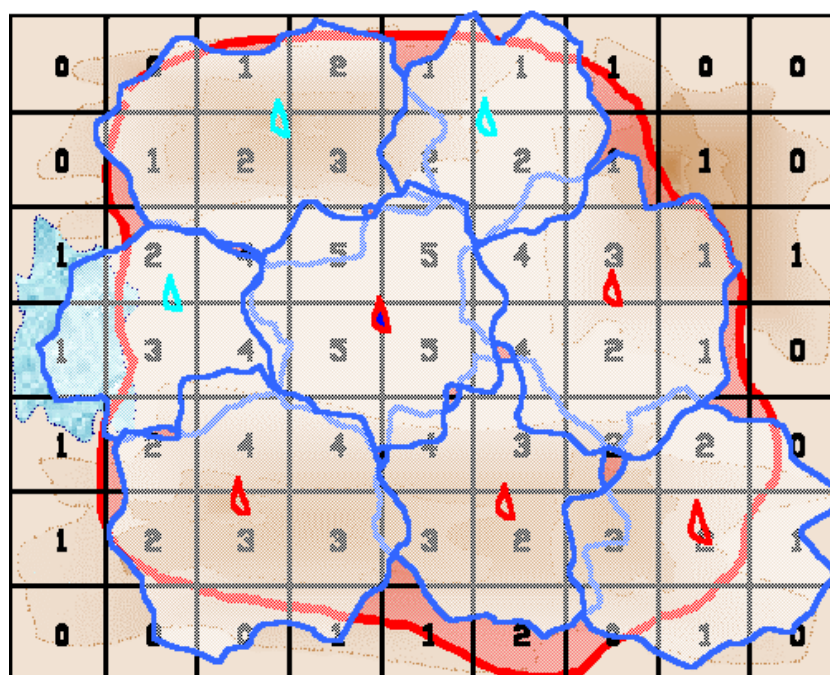


Figura 4.6 - Redefinição do projeto

#### 4.1.8 - Teste de campo

- Os testes de campo são muito demorado e dispendiosos, por isto faz-se primeiro a análise computacional da cobertura. A partir desta análise são realizados muitos testes de campo em torno das regiões mais críticas e poucos em torno das outras.

- Neste caso é necessário uma equipe especializada para manusear e programar equipamentos como computador, *scanner* de frequência, equipamento *Global Position System* (GPS) e analisador de espectro.
- As ERB são simuladas com o uso de transmissores em torres provisoriamente instaladas nos locais pré-definidos das ERB. Os sinais transmitidos são capturados por rádio receptores. A equipe de teste circula em torno da região com veículos equipados com os equipamentos já citados gravando os parâmetros dos sinais recebidos e sua localização.
- São estes testes que apontam o real comportamento do sistema e assim são feitos os ajustes finos nas ERB.

---

#### 4.1.9 - Implantação do sistema

---

- O processo de implantação do sistema projetado acompanha um cronograma de projeto bem definido, muito revisado e apresentado em uma estrutura analítica.
- O processo de implantação deve ter único coordenador técnico do início ao fim. O *staff* deve ser composto por profissionais competentes acompanhados de uma equipe compatível. É, geralmente, definida a seguinte *linha de staff* ligada diretamente ao coordenador do projeto:
  - Gerente Geral
  - Gerente de Projeto
  - Gerente de Infra-estrutura
  - Gerente de Instalações/Testes
  - Gerente de Operações

- A Gerência de Projeto deve ter seu próprio organograma com definição dos níveis de chefia cada uma com seu próprio cronograma sincronizado com o cronograma de projeto. O cronograma de chefia são sempre atualizados com a emissão de relatórios mensais de progresso.
- A Gerência de Infra-estrutura é responsável pelas obras civis, energia, iluminação, ar condicionado, aterramento, etc..

---

## 4.2 - Aspectos de propagação

---

- O projeto de um sistema de comunicações móvel celular têm a finalidade de prover acesso ao serviço em toda a área proposta ao usuário, isto é utilizando o menor número possível de ERB. Mas nem sempre é possível uma cobertura de 100% da área proposta. Assim, o projeto deve considerar a cobertura adequada de regiões com tráfego expressivo e ser flexível nas regiões de pouco tráfego.
- O primeiro passo para o projeto de cobertura é definir que área geográfica onde o acesso ao serviço será possível. Quanto maior a área de cobertura, maior a mobilidade para os usuários do sistema, conseqüentemente será maior também a quantidade de ERB a serem utilizadas. Portanto, um estudo detalhado da área a ser coberta nos aspectos de topografia e tráfego é fundamental para a elaboração de um projeto eficaz e economicamente viável. O aspecto de tráfego será detalhado adiante. Com relação a propagação do sinal de rádio móvel, o terreno pode influenciar sob três aspectos:
  - Obstrução: Obstáculos como montanhas, prédios, árvores ou a própria superfície terrestre podem bloquear parcialmente o feixe causando a atenuação por obstrução.

- **Reflexão:** Regiões razoavelmente planas como mares, lagos e planícies podem refletir o feixe de ondas com oposição de fase em relação ao sinal direto, causando a atenuação por interferência.
- **Difração:** Gumes como o cume de montanhas, canto de prédios, ou a própria cunhada podem desviar parcialmente o feixe causando a difração do sinal.
- A cobertura do sinal pode ser simulada através de modelos de predição apresentados no Capítulo 5. Pela necessidade de conhecimento do tipo de terreno no qual o sinal vai ser transmitido, no estudo de propagação do sinal de rádio móvel, considera-se a área de serviço sob as seguintes condições:

<b>Estruturas Artificiais</b>	<b>Terreno</b>
Em área aberta	Sobre terreno plano
Em área suburbana	Sobre terreno montanhoso
Em área urbana	Sobre água
---	Através de folhagem

**Quadro 4.1 - Condições de propagação**

- A localização de uma ERB baseado na predição de cobertura tem índices de acerto maiores que 50 % dependendo do algoritmo de predição. Os planos de urbanização, as área sob litígio, dentre outros fatores, impossibilitam o posicionamento de algumas ERB. Neste caso, deve-se escolher um novo local e realizar novos estudos de predição de cobertura.

### 4.3 - Interferências

- Sabemos que os sistemas de comunicação de rádio móvel são limitados tanto por espectro como por interferência. O estudo da qualidade da transmissão relaciona parâmetros de interferência com a potência transmitida.
- Dentre estas relações a mais utilizada é a relação portadora/interferência co-canal ( $C/I_c$ ). Esta relação  $C/I_c$  varia de acordo com a padrão celular da seguinte forma.
- Vamos calcular a relação  $C/I_c$  para pior o caso, ou seja, a EM está na periferia da célula recebendo um sinal interferente da co-célula mais próxima. Assim, seja  $C$  a potência recebida na periferia de uma célula de raio  $R$ . Seja  $I_c$  a potência interferente da co-célula mais próxima. Então, para uma distância  $D$  entre co-células, temos a distância entre a EM e a ERB da co-célula igual a  $(D - R)$ .
- Dado que a potência recebida  $w$  decresce com a distância  $d$  na forma  $d^{-\alpha}$ . Então, em um ambiente com parâmetros de relevo, frequência, ganhos e alturas de antenas constantes, a potência  $C$  recebida pela ERB original é dada por  $C = f(R^{-\alpha})$  e a potência interferente  $I_c$  é dada por  $I_c = f((D-R)^{-\alpha})$ . Neste caso a relação  $C/I_c$  é dada por

$$C/I_c = [R / (D - R)]^{\alpha} = [(D/R) - 1]^{\alpha} \quad (4.1)$$

- Mas temos da EQUAÇÃO 2.6 que,  $D/R = \sqrt{3N}$  onde  $N$  representa o número de célula por *cluster*, ou seja, o Padrão Celular. Desta forma, foram relacionamos o Padrão de Reuso com a relação  $C/I_c$  na forma:

$$C/I_c = [\sqrt{3N} - 1]^a \quad (4.2)$$

onde  $a$  é o coeficiente de perda por percurso de propagação definido pelas características do canal de rádio móvel num dado ambiente.

- Na verdade devemos considerar todas os sinais interferentes provenientes das co-células mais próximas como também das co-células mais distantes que ainda contribuem à degradação do sinal desejado.

---

#### 4.4 - Aspectos de comutação

---

- A Central de Controle e Comutação é o cérebro do sistema de comunicação móvel celular. É composta basicamente de uma unidade de controle e uma unidade de comutação.
- A unidade de controle de uma CCC pode ser entendida como computador que controla funções específicas de uma sistema de comunicação móvel celular, tal como alocação de frequência, controle do nível de potência das EM, procedimento de *handoff*, controle de tráfego, rastreamento, localização, tarifação e associação de canais são fatores de limitação do sistema. Portanto, a capacidade de processamento da unidade de controle nas CCC deve ser maior que a de sistemas de telefonia fixa.
- A unidade de comutação é similar ao das centrais telefônicas fixas, mas seu processamento é diferente. Na comutação telefônica fixa, a duração da chamada não é fator relevante ao sistema, enquanto que em um sistema de comunicação móvel celular essa duração é função do gerenciamento dos canais e do número de *handoff* processados.



- Dois parâmetros são considerados no projeto dos sistemas de comutação: a **Acessibilidade** e a **Gradação**.
- A **Acessibilidade** representa a capacidade de tráfego de um grupo de canais determinada pelo número destes canais que podem ser atingidos pelas chamadas que ingressam no sistema de comutação. Esta é considerada **Constante** quando é igual em todos os instantes, **Plena** quando seu valor é constante e igual à quantidade de troncos do grupo de saída, e **Limitada** em outra situação.
- A **Gradação** representa um esquema de interconexão de grupos de canais. Em uma CCC com Acessibilidade Limitada, canais de entrada são agrupados e associados a um grupo de canais de saída, formando um subgrupo de gradação. O aumento da capacidade de tráfego acontece quando há uma associação eficaz entre os canais de entrada no sistema de comutação e os subgrupos de saída.

---

## 4.5 - Aspectos de tráfego

---

- Os sistemas de comunicação móvel celular são projetados para que as chamadas realizadas tenham boa probabilidade de sucesso nas horas de maior movimento do sistema. Para isto define-se o **Grau de Serviço (GOS)**, também conhecido como de **Probabilidade de Bloqueio (B)**, e que representa o percentual de tentativas de comunicação mal sucedidas pelo usuário devido ao congestionamento do sistema, ou seja, é a relação entre o tráfego perdido e o tráfego oferecido. Valores típicos de GOS em sistemas de telefonia celular atingem de 2% a 5%.
- A **Hora de Maior Movimento (HMM)** é definida como o período de 60 minutos do dia nos quais a intensidade de tráfego de um grupo de canais atinge o



seu valor máximo, tomada a média dos valores nos dias da semana. O **GOS** determina a quantidade de troncos e equipamentos de comutação necessários para atender adequadamente o tráfego telefônico durante as horas de maior movimento. Podemos em certas condições, considerar a **HMM** do sistema, de um *cluster* ou de uma célula mais congestionada.

- A **Intensidade de Tráfego** é uma medida de densidade, portanto adimensional, representada pela unidade *Erlang*. A **Intensidade de Tráfego** indica o número médio canais ocupados ao mesmo tempo, ou seja, é calculado pela relação entre a somatória dos tempos de ocupação de  $N$  canais e o tempo de observação. Um canal ocupado continuamente corresponde 1 *Erlang*.
- Várias equações tem sido sugeridas para o estudo do tráfego móvel celular. Um modelo bem aceito é conhecido como fórmula *Erlang-B*. Esta fórmula relaciona o **GOS** com o número de canais em um grupo ( $N$ ) e o tráfego oferecido por este grupo ( $A$ ). Aprofundaremos o estudo de tráfego no Capítulo 5 e ainda apresentaremos técnicas de expansão do sistema em termos de Tráfego Oferecido.
- O objetivo de qualquer sistema é atender o maior número de assinantes possível mantendo um aceitável **GOS**. No caso de dimensionamento prático de um sistema deve-se observar a Acessibilidade e Graduação, o perfil do tráfego, suas propriedades estatísticas e **GOS** exigido.

---

## Capítulo 5 - Engenharia de tráfego móvel

---

*Este Capítulo tem por objetivo introduzir o leitor a teoria de tráfego, aos modelos de tráfego aplicados aos sistemas comunicação móvel celular. São apresentadas técnicas de expansão da capacidade de tráfego do sistema.*

---

### 5.1 - Definições Básicas

---

- Apresentamos a seguir algumas definições básicas que envolvem o estudo de tráfego:
- 

#### Tempo de Ocupação (t)

- Tempo total em que uma dada chamada ocupa um canal.
- 

#### Volume de Tráfego (V)

- Soma dos Tempo de Ocupação de todos os canais de um sistema é dada pela expressão:

$$V = \sum_{i=1}^n t_i \quad (5.1)$$

onde **n** é o número total de canais do sistema e **t<sub>i</sub>** é o tempo de duração da chamada **i**.

---

### Intensidade de Chamadas (I)

- Número de chamadas que ocorrem em um conjunto de canais em um dado intervalo de tempo.

---

### Tempo Médio de Chamada ( $t_m$ )

- A média dos tempos de ocupação por um dado intervalo de tempo, neste caso  $t_m = V/n$ .

---

### Hora de Maior Movimento (HMM)

- O período de uma hora do dia no qual a Intensidade de Tráfego de um grupo de canais atinge o seu valor máximo.
- Os sistemas de comunicação móvel celular são projetados para que as chamadas realizadas tenham boa probabilidade de sucesso na Horas de Maior Movimento. Neste caso podemos considerar a HMM do sistema, de um *cluster* ou de uma célula mais congestionada.

---

### Probabilidade de Bloqueio (B)

- Percentual de tentativas de comunicação mal sucedidas pelo usuário devido ao congestionamento do sistema, ou seja, é razão entre o número de chamadas entrantes mal sucedidas pelo número total de chamadas entrantes.

---

### Intensidade de Tráfego (A)

- Densidade do Volume de Tráfego no tempo. A unidade de Intensidade de Tráfego é o Erlang e representa exatamente uma hora de sistema ocupado em uma hora de observação.
- A Intensidade de Tráfego pode ser interpretada de três formas:
  1. *o número médio de canais ocupados em uma hora de observação;*
  2. *o tempo necessário para escoamento de todo o tráfego por um único canal e;*
  3. *o número médio de chamadas originadas durante um intervalo igual ao Tempo Médio de Chamada.*

---

### **Exemplo 5.1**

- Considere um sistema com 15 canais. Dado que 2 canais estiveram ocupados por 4 horas cada, 4 canais por 6 horas cada, 4 canais por 10 horas cada e 5 canais por 12 horas cada, tudo isto em um período de um dia de observação. Logo temos:

---

### Tráfego Escoado (Ae)

- Porção da Intensidade de Tráfego equivalente às chamadas entrantes ao sistema e que foram atendidas.

---

### Tráfego Oferecido (Ao)

- Intensidade de Tráfego máxima suportada pelo sistema.
- 

### Tráfego Requerido (Ar)

- Intensidade de Tráfego gerada (requerida) pelos usuários.
- 

### Tráfego Perdido (Ap)

- Intensidade de Tráfego não atendida pelo sistema devido ao congestionamento dos canais no instante da geração da chamada.
- 

### Grau de Serviço (GOS)

- Relação entre o Tráfego Perdido e o Tráfego Oferecido. Na verdade, é igual à Probabilidade de Bloqueio. Valores típicos de GOS em sistemas de telefonia celular atingem de 2% a 5%.
  - O GOS determina a quantidade de troncos e equipamentos de comutação necessários para atender adequadamente o tráfego telefônico durante a **Hora de Maior Movimento**.
- 

## **5.2 - Modelos de Tráfego**

---

- O planejamento de um sistema celular sempre é feito com o objetivo de atender o maior tráfego possível. Para isto, estuda-se o perfil do futuro tráfego nas

diversas regiões da suposta área de cobertura com relação a mobilidade e sua contribuição na Hora de Maior Movimento.

- É exatamente o suposto Tráfego Requerido que norteia a distribuição de ERB, a escolha do Padrão de Reuso e a alocação dos canais nas células. Logo a questão é modelar o tráfego móvel celular de modo a prever HMM e mobilidade do sistema.
- Vários modelos têm sido propostos para uma modelagem do tráfego móvel celular. Sempre é considerado um modelo de origem de chamadas e um modelo de duração de chamadas.
- Devido ao comportamento aleatório dos processos de origem e término das chamadas, os modelos estatísticos têm tido preferência nos estudos de tráfego móvel. Dentre eles destacamos a distribuição de Poisson para modelar a origem de chamadas e a distribuição exponencial negativa para modelar a duração de chamadas.

---

### 5.2.1 - Modelo de origem de chamadas

---

- Considere um processo onde não há a possibilidade de mais de uma chamada serem originadas no mesmo instante, que temos eventos independentes e que o número de assinantes do sistema é muito maior que o número de canais.
- Neste caso a distribuição de Poisson é considerada a que melhor expressa este tipo de tráfego pela sua característica exponencial negativa.
- A distribuição de Poisson é calculada a partir da seguinte densidade de probabilidade:

$$P_o = \frac{(\lambda t)^k e^{-(\lambda t)}}{k!} \quad (5.2)$$

onde  $k$  é o número de chamadas originadas,  $t$  é o tempo de observação e  $\lambda$  é a taxa média de origem de chamadas.

- Assim, a probabilidade  $P_o$  de uma chamada ser originada em um intervalo de tempo inferior a  $T$  é dado por

$$P_o(t < T) = \int_0^t \lambda t e^{-(\lambda t)} dt = e^{-(\lambda T)} \quad (5.3)$$

- O algoritmo em Pascal apresentado a seguir é utilizado para devolver um número de chamadas originadas por unidade de tempo, segundo a distribuição de Poisson, com taxa  $\lambda$ .

```

function origem ( taxa : real ) : integer ;
var
  k : integer ;
  x , y : real ;
begin
  y := exp ( - taxa ) ;
  x := 1 ;
  k := -1 ;
  repeat
  begin
  x := x * Random ;
  k := k + 1 ;
  end;
  until x <= y ;
  origem := k ;
end;

```

Quadro 5.1 - Gerador de processo poissoniano

## 5.2.2 - Modelo de Duração de Chamadas

- O tempo médio de duração das chamadas é estudado considerando-se que o término de uma chamada em um dado intervalo é diretamente proporcional ao tamanho do intervalo. Este é um processo exponencial negativo com densidade de probabilidade dada por:

$$p_t = \mu e^{-(\mu t)} \quad (5.4)$$

onde  $t$  é o tempo de observação e  $1/\mu$  é o tempo médio de duração de uma chamada. Assim, a probabilidade  $P_0$  de uma chamada ser terminada em um instante inferior a  $T$  é:

$$P_t = \int_{t=0}^T \mu e^{-(\mu t)} dt = 1 - e^{-(\mu T)} \quad (5.5)$$

- O algoritmo em Pascal apresentado a seguir é utilizado para devolver a duração de uma chamada segundo um processo com distribuição exponencial negativa com taxa  $\mu$ .

```
function duração ( taxa : real ) : integer ;  
begin  
    duração := - taxa * ln ( Random ) ;  
end;
```

Quadro 5.2 - Gerador de processo exponencial negativo



---

### 5.3 - Engenharia de tráfego móvel

---

- No planejamento de um sistema de comunicação de rádio móvel na engenharia de tráfego baseia-se nas relações entre Tráfego Oferecido (A), número de canais disponível (N) e Grau de serviço (GOS).
- É evidente que o projetista deve procurar atender o maior tráfego possível, economizando espectro (número de canais), mas garantindo um Grau de Serviço em que o usuário se sinta confortável o suficiente para não precisar trocar de operadora.
- No dimensionamento prático de um sistema deve-se também observar a Acessibilidade e a Graduação, o perfil do tráfego, suas propriedades estatísticas e GOS exigido pelo usuário.
- Várias fórmulas englobando os três parâmetros citados acima foram estudadas para diferentes casos de tráfego móvel. Apresentamos a seguir as mais utilizadas.

---

#### 5.3.1 - Fórmula de Poisson

---

- A fórmula de Poisson representa um sistema com um número infinito de usuários podendo acessar um número finito de canais.
- Esta fórmula é tipicamente aplicada às centrais de comutação de telefonia fixa e é dada por:

$$GOS = 1 - e^{-A} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} A^i / i! \quad (5.6)$$

- O algoritmo em Pascal a seguir é utilizado para calcular o GOS pela fórmula de Poisson.

```
function gos ( n : real , a : real ) : integer ;  
var  
  i : integer ;  
  x , y : real ;  
begin  
  x := 1 ;  
  y := 1 ;  
  i := 0 ;  
  repeat  
  begin  
    x := x * a / i ;  
    y := y + x ;  
    i := i + 1 ;  
  end ;  
  until ( i = n )  
  gos := 1 - y * exp ( - a ) ;  
end ;
```

Quadro 5.3 - Cálculo de GOS pela fórmula de Poisson

---

### 5.3.2 - Fórmula de Erlang-B

---

- Um modelo bem aceito para as comunicações móveis é a fórmula Erlang-B.
- Esta fórmula considera um número de usuários bem maior que o número de canais e as antes chamadas consideradas perdidas ainda podem ser encaminhadas em rotas alternativas (outras células).

$$GOS = \frac{A^N / N!}{\sum_{i=0}^N A^i / i!} \quad (5.7)$$

- Os resultados desta fórmula são apresentados na Tabela 5.1 (Tabela Erlang-B).
- O algoritmo em Pascal a seguir é utilizado para calcular o GOS pela fórmula de Erlang-B.

```
function gos ( n : real , a : real ) : integer ;  
var  
  i : integer ;  
  x , y : real ;  
begin  
  x := 1 ;  
  y := 1 ;  
  i := 0 ;  
  repeat  
  begin  
    x := x * a / i ;  
    y := y + x ;  
    i := i + 1 ;  
  end ;  
  until ( i = n + 1 )  
  gos := x / y ;  
end ;
```

Quadro 5.4 - Cálculo de GOS pela fórmula de Erlang-B

---

### 5.3.3 - Fórmula de Engset

---

- Esta fórmula também é conhecida por Erlang-Engset e considera um número finito de usuários no sistema acessando os canais.
- Neste caso as chamadas bloqueadas são descartadas.
- A fórmula de Engset considera o número de assinantes (**S**) na forma:

$$GOS = \frac{\frac{(S-1)!}{N!(S-1-N)!} \left[ \frac{A}{(S-A)(1-P)} \right]^N}{\sum_{i=0}^N \frac{(S-1)!}{i!(S-1-i)!} \left[ \frac{A}{(S-A)(1-P)} \right]^i} \quad (5.8)$$

- O algoritmo em Pascal a seguir é utilizado para calcular o GOS pela fórmula de Engset.

```

function gos ( n, a, s : real ) : integer ;
var
  i : integer ;
  x , y, j, k, o : real ;
begin
  k := 1 ;
  repeat
  begin
  x := 1 ;
  y := 1 ;
  j := k ;
  i := 0 ;
  repeat
  begin
  x := x * a / ((s - a * (1 - j)) * (s - i) / i ;
  y := y + x ;
  i := i + 1 ;
  end;
  until ( i = n + 1 )
  k := x / y ;
  o := Abs ( j - k ) ;
  end;
  until ( o <= 0.00001 )
  gos := o ;
end;

```

Quadro 5.5 - Cálculo de GOS pela fórmula de Erlang-B

---

## 5.4 - Dimensionamento do sistema

---

- Para o dimensionamento de tráfego de um sistemas devemos obter o número de futuros usuários do sistema, o tráfego requerido por cada usuário e sua distribuição geográfica. Na verdade isto é impossível. Imagine correr atrás de 10 mil, 20 mil ou até 400 mil usuários fazendo perguntas.
- O que se faz é dividir a suposta área de serviço em quadrículas e estimar o número de usuários na quadrícula em situação de **HMM** e tráfego médio gerado por usuário. Assim, basta multiplicar o tráfego médio por usuário pelo número de usuários que teríamos o Tráfego Requerido total em uma determinada quadrícula em situação de **HMM**.
- Uma célula englobaria então um grupo de quadrículas onde se calcularia o Tráfego Requerido total pela somatória do Tráfego Requerido de cada quadrícula ou de suas proporções.
- A partir do Tráfego Requerido na célula, considerando-se certo **GOS**, utiliza-se a fórmula de **Erlang-B**, ou qualquer uma das apresentadas se for mais conveniente, para estimar o número de canais a serem alocados àquela célula.

---

### Exemplo 5.2

---

- Suponha uma condição ideal onde os supostos usuários do sistema estão uniformemente distribuídos na área de serviço e geram o mesmo tráfego cada um. Neste caso, dado um número de futuros usuários do sistema igual a **20 mil**, sendo que cada assinante gera um tráfego de **0.025 Erl**, isto em uma área de ser-

viço de **20 km<sup>2</sup>**, deve-se projetar um sistema que atenda a estes usuários com um **GOS** inferior a **2 %**.

- O primeiro passo é calcular o Tráfego Requerido total do sistema. Isto é feito pela soma do tráfego individual de cada assinante. Neste caso:

$$A = 20.000 \times 0.025$$

$$A = 500 \text{ Erl}$$

- Pela Tabela Erlang-B, **TABELA 5.1**, seriam necessários mais de 500 canais em uma única ERB atendendo toda a área de serviço.
- Mas lembre-se que nosso ambiente é o celular. Assim, supondo que cada ERB suporta até **46 canais**, temos da TABELA Erlang-B que cada célula pode atender **36,5 Erl** cada.
- Assim, serão necessárias pelo menos **13,7 células no sistema**. Na verdade, devemos escolher **14 células** que juntas oferecerão **511 Erl** ao sistema (**14 x 36,5**), ou seja, um acréscimo de **11 Erl** ao inicialmente projetado.
- Note que estes **11 Erl** representam mais **440 assinantes** atendidos com o mesmo **GOS (11/0.025)**. Projetamos um sistema para atender **20.440 assinantes**.
- Tomemos que o espectro alocado ao sistema possui **largura de faixa de 25 MHz**. Se cada canal (voz/controlado) ocupa **30 kHz** (FM/FSK) **por portadora**, e que cada comunicação necessita de duas portadoras (ERB>EM e EM>ERB), então são necessários **60 kHz de canal duplex** para comunicação.

- Neste caso temos **416 canais** no sistema (**25MHz/60kHz**). Considerando que **21** destes canais são Canais de Controle (par FOCC/RECC), temos disponíveis **395** Canais de Voz.
- Como cada célula possui **46 canais**, podemos escolher um Padrão de Reuso de **7 células por cluster**. Isto porque cada subgrupo de canais utilizado em cada célula do *cluster* teria **56 canais** disponíveis do espectro alocado ao sistema (**395/7**), ou seja, o mais que suficiente para oferecer os **46 canais** necessários.
- Como foi calculado o número de **14 células** para atender o tráfego requerido do sistema e com folga, o Padrão de Reuso escolhido determina que teremos dois *clusters* no sistema. Na verdade, poderemos ter mais que dois *clusters* no sistema caso não haja exatamente dois conjuntos de células contíguas. Neste caso, tomamos um conjunto de células contíguas por um *cluster* e formamos *clusters* incompletos com as demais células na medida do possível.
- Agora, considerando-se **14 células** em uma área de **20 km<sup>2</sup>**, teríamos uma área de **1,428 km<sup>2</sup>** por célula (**20/14**). No caso de células circulares teríamos então células de **674 m** de raio.
- Esta é apenas uma das abordagens utilizando engenharia de tráfego no planejamento de sistemas celulares. Outras abordagens podem ser consideradas como, por exemplo, partido de um Padrão de Reuso ou tamanho de célula predefinidos.

---

## 5.5 - Técnicas de expansão do sistema

---

- O objetivo das operadoras é o lucro, e este é conseguido através da expansão do sistema para o atendimento de um número maior de assinantes. Tanto a detecção como a criação de necessidades de novos serviços podem ser fatores para aumento de demanda no sistema. Estudaremos a seguir algumas técnicas de expansão do sistema móvel celular.

---

### 5.5.1 - Degradação do grau de serviço

---

- A degradação do Grau de Serviço é a primeira investida das operadoras para acomodar novos assinantes. É fácil perceber pelos modelos de tráfego já sugeridos que quanto menos exigente no **GOS**, mais tráfego pode ser atendido com um mesmo número de canais.
- Mas observe que esta atitude deve ser apenas temporária, pois a degradação da qualidade do serviço prestado, detectada pelo usuário pelo aumento da ocorrência de insucessos ao tentar acessar o sistema (aumento da probabilidade de bloqueio), é um fator de desânimo e que muitas vezes faz o usuário trocar de operadora em busca de um serviço melhor.
- Tomemos o **Exemplo 5.2**. Se para os mesmos **46 canais por célula** aceitássemos um **GOS de 5%** estaríamos oferecendo um tráfego de **40,5 Erl por célula**, o que representariam **567 Erl** oferecidos pelo sistema (**14 x 40,5**). Assim passaríamos a atender **22.680 assinantes** no sistema (**567/0.025**). Seriam **2.240 assinantes a mais** do que o projeto original do sistema.



---

### 5.5.2 - Adição de novos canais

---

- A adição de novos canais nas células de um sistema só pode ser feita se o projeto inicial não contemplou todos os possíveis canais de um subgrupo em um certo Padrão de Reuso.
- Tomemos novamente o **Exemplo 5.2** onde projetamos um sistema em que apenas 46 dos possíveis 56 canais de cada subgrupo foram utilizado. Se naquele caso as ERB suportassem como limite máximo exatamente estes 56 canais, ainda poderíamos expandir o sistema oferecendo **mais 10 canais por célula**.
- Neste caso os **56 canais** suportariam um tráfego de **45,9 Erl** por célula, ou seja, seriam **642,6 Erl** oferecidos pelo sistema (**14 x 45,9**) e atendendo um total de **25.704 assinantes** com o mesmo **GOS** de **2%** (**642,6/0.025**). Seriam atendidos **5.264 assinantes a mais** que o projeto original.

---

### 5.5.3 - Empréstimo de frequências

---

- O empréstimo de frequências é feito quando um ERB precisa oferecer um tráfego maior que o oferecido pelo número de canais máximo definido pelo Padrão de Reuso.
- Neste caso, o projetista do sistema atropela o Padrão de Reuso e aloca frequências a esta ERB fora de seu subgrupo original. Logo as células co-canais cedentes mais próximas desta ERB não pode utilizá-las.
- Perceba que não há grandes alterações de *hardware*. Basta as ERB possuírem rádio disponíveis para sintonizarem as novas portadoras.

- Na verdade, o projetista pode fazer isto com quantas células quiser dependendo da distribuição geográfica do tráfego. Perceba que o empréstimo atende apenas a uma determinada região do sistema de maior tráfego, por isto constitui uma alternativa temporária aguardando a expansão física do sistema.

---

#### 5.5.4 - Mudança do padrão celular

---

- Esta técnica constitui a solução mais definitiva e verdadeiramente de expansão do sistema, apesar do alto custo. Neste caso, a mudança de um Padrão de Reuso maior para um menor significa diminuirmos o número de células por *cluster*. Significa, também, alocarmos um maior número de canais por célula.
- Agora, observe que se mantivermos as células originais, com a mesma área coberta e a mesma ERB, estaremos apenas aumentando o número de canais na mesma região celular. Seria apenas uma questão de configuração de *software* da CCC e a implantação de novos equipamentos de rádio nas ERB.
- Retornando novamente ao **Exemplo 5.2**, se mudarmos o Padrão de Reuso de 7 para 4 células por *cluster*, teríamos agora **99 canais** disponíveis do espectro alocado ao sistema (**395/4**). Se expandirmos as ERB para suportar estes 99 canais podemos oferecer **87 Erl por célula** a um **GOS** de **2%**.
- Neste sistema com 14 células passaríamos a oferecer então **1.218 Erl (14 x 87)**, o que representaria **48.720 assinantes** atendidos com **GOS** de **2%**. Isto representaria um aumento de **mais 28.280 assinantes**, mais de 120% de aumento.
- Um questão muito importante a ser observada é que pela mudança do Padrão de Reuso teremos, inevitavelmente, uma degradação da qualidade de transmissão, isto devido à menor distância de reuso no sistema.

### 5.5.5 - Cell splitting

- Quando é detectado um aumento inesperado de tráfego em determinada região do sistema já implantado, por exemplo, pela inauguração de um *shopping center* não prevista para a região, o projetista pode fazer da técnica de *cell splitting*.
- Esta técnica consiste em dividir um pequeno grupo de células em células bem menores mas ainda obedecendo o Padrão de Reuso.
- Assim, para novas células de raio  $k$  vezes menor que as originais teremos uma redução da área coberta e aumento de ERB de ambos de  $k^2$ .
- Na verdade, temos alguns fatores que limitam a aplicação desta técnica como: a distância mínima de reuso em função da degradação da qualidade de voz, a possibilidade de locação das novas ERB e os aspectos econômicos envolvidos.

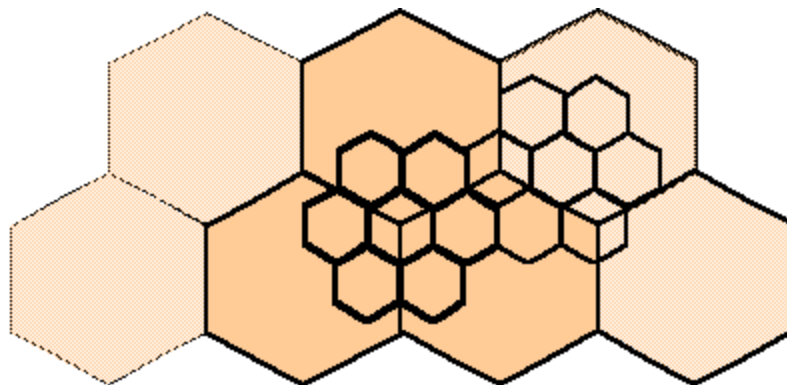


Figura 5.1 - Cell splitting

---

### 5.5.6 - Células *overlaid* e *underlaid*

---

- Outra técnica utilizada para concentrar tráfego em uma determinada região é o de criar células sobrepostas de raios diferente, tanto nas células omnidirecionais como nas células setorizadas.
- Esta técnica garante que uma quantidade maior de canais esteja disponível dentro da célula menor, onde o usuário pode acessar tanto os canais desta célula quanto os canais oferecidos pela célula maior.
- A vantagem desta técnica é que não há necessidade de modificar a infraestrutura já existente, como ocorre no *cell splitting*. Observe que um algoritmo de alocação de canais que priorize a ocupação dos canais da célula menor garante **GOS** aos usuário na periferia.

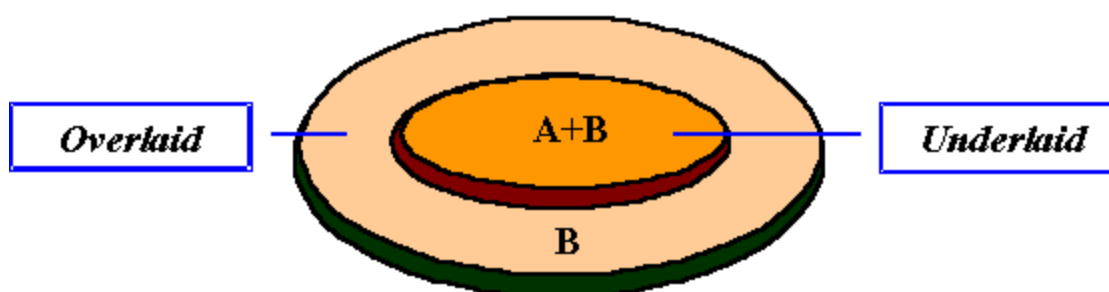


Figura 5.2 - Overlaid – Underlaid

---

### 5.5.7 - Setorização

---

- A setorização é uma excelente técnica tanto para aumentar a capacidade do sistema, quanto para diminuir as interferência co-canal. Nesta técnica a área

celular é dividida em setores servidos por diferentes frequências. Tipicamente temos 3 ou 6 setores ( $120^\circ$  ou  $60^\circ$ ).

- Note que podemos ter duas situações. Na primeira considera-se que o grupo original de canais de uma célula é redistribuído no novos setores da célula configurando uma mudança no Padrão de Reuso. Na segunda situação considera-se que cada setor trona-se uma nova célula do sistema mantendo o Padrão de Reuso original e o mesmo número da canais das células originais. Vamos analisar caso a caso tendo como referência o **Exemplo 5.2**.

---

### Caso 5.1

---

- Neste caso há mudança do Padrão de Reuso que é multiplicado pelo número de setores por célula. Tomemos como exemplo um processo de setorização com 3 setores por célula.
- Neste caso o número de canais por setor é igual **15 canais** em dois setores e **16 canais** no terceiro (**46/3**). Como cada célula gerou 3 setores (novas células) temos agora **42 células no sistema**, sendo que 28 (**2/3**) destas com 15 canais e 14 (**1/3**) com 16 canais.
- Verificamos que cada célula de **15 canais** pode absorver um tráfego de até **9,01 Erl** e que as células com 16 canais absorvem até **9,83 Erl** cada, tudo isto considerando um **GOS** de **2%**.
- Logo o tráfego total oferecido pelo sistema é de **389,9 Erl** (**28 x 9,01 + 14 x 9,83**). Este tráfego oferecido é capaz de atender **15.596 assinantes**.
- Na verdade, o que aconteceu foi um **decrécimo de 4.844 assinantes** que antes eram atendidos.

- Neste caso não é a expansão do sistema o objetivo da setorização, mas sim a melhoria na qualidade da transmissão uma vez que o Padrão de Reuso original igual a 7 foi alterado para um **Padrão de Reuso igual a 21 (3 x 7)**.

---

## Caso 5.2

---

- Aqui não há mudança do padrão celular. **Cada setor passa a ser um nova célula do sistema** e com o mesmo número de canais originais por célula.
  - Desta forma a mesma região antes atendida por **uma única célula oferecendo 36,5 Erl**, agora é atendida por três células oferecendo os mesmos **36,5 Erl cada uma**.
  - Assim, triplicamos o tráfego oferecido pelo sistema que agora é de **1.533 Erl (3 x 511)** que atendem a **61.320 usuários (3 x 22.040)**. Isto representa **40.880 assinantes a mais** considerando o mesmo **GOS de 2%**.
  - Observe que neste caso mantemos a mesma relação **D/R**, mas a utilização de antenas diretivas diminui muito a interferência co-canal.
  - O que ocorre na realidade é que, como cada setor é uma nova célula, teremos *clusters* menores, logo mais *clusters* no sistema.
- Em ambos os casos não há despesas de infra-estrutura, pois mantêm-se mesmas ERB. A expansão é muito facilitada pela característica modular das ERB e da CCC. Desta forma, esta técnica se apresenta com custo bem mais baixo que o *cell splitting*.

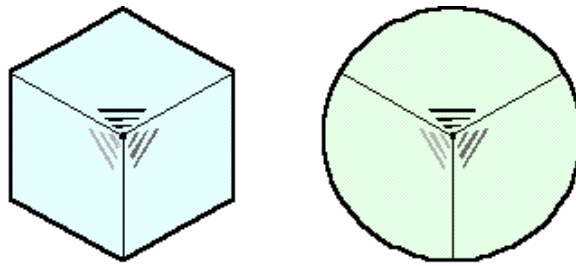


Figura 5.3 - Setorização celular

## 5.6 - Eficiência do sistema

- Os estudos anteriores já sugerem o que se entende por **Eficiência de Tráfego**, neste caso, objetiva-se o maior número de assinantes por canal provendo um dado **GOS**. Mas os sistemas de comunicação via rádio também levam em consideração relação entre espaço, frequência e tempo conhecida por Eficiência de Espectro.
- A **Eficiência de Espectro** tem por objetivo maximizar o uso dos recursos do espectro para atender a maior área possível, com o maior tráfego oferecido e com compromisso com a boa qualidade de transmissão e **GOS**.
- A fórmula apresentada a seguir representa estas relações e dão um resultado na unidade de [ **Erl/(m<sup>2</sup> . Hz)** ].

$$\eta = \frac{\text{n}^\circ \text{ Clusters}}{\text{área cobrta}} \times \frac{\text{canais do sistema}}{\text{faixa do sistema}} \times \frac{\text{ocupação do canal}}{\text{ocupação do sistema}} \quad (5.9)$$

- *Verifique na primeira relação que quanto mais cluster por unidade de área servida, maior será a densidade de tráfego.*

- *Na segunda relação temos que quanto mais canais forem possíveis dentro da largura de faixa do sistema, maior será a densidade de canais.*
- *Finalmente, quanto mais ocupado forem os canais disponíveis, maior será o aproveitamento de cada canal do sistema.*
- Em sistemas digitais temos valores Eficiência de Espectro entre **10** e **1** (bit/s)/(m<sup>2</sup> . Hz).

---

## 5.7 - Simulação de tráfego móvel celular

---

- Apresentamos a seguir o fluxograma de parte de um algoritmo de simulação de tráfego em um ambiente móvel celular. Utilizamos os modelos de geração de chamadas e duração de chamadas descrito na seção anterior.
- Observe que a característica de se trabalhar com taxas em ambos os modelos traz grandes facilidade à simulação.
- Por exemplo, não são consideradas as áreas de cobertura de cada célula do sistema, nem o tempo de simulação ou duração das iterações, nem a posição dos assinantes na célula ou sua mobilidade.
- São definidas taxas de *handoff* para cada dupla de células adjacentes. Mas podemos ainda definir estas taxas para alguma célula que tem seu sinal propagado além do projetado devido às condições do relevo e atinge outra célula não adjacente a esta.
- As células a serem simuladas estão dispostas em uma fila de acordo com a ordem que foram sendo selecionadas pelo usuário. As taxas de *handoff* são



utilizadas pela distribuição de Poisson gerando chamadas para a célula adjacente.

- Os processos de *handoff* originados na célula corrente tem prioridade absoluta em relação as chamadas entrantes nas células subseqüentes. Isso acontece devido a arquitetura em *pipeline* utilizada no algoritmo que processa todos os eventos da célula corrente antes de prosseguir para a próxima célula na fila de simulação.
- Apresentamos na **FIG. 5.4** o fluxograma onde **T** representa o tempo de simulação, **N** os canais, **C** as chamadas,  **$I_i$** ,  **$m_i$**  e  **$I_{ij}$**  as taxas de geração duração e *handoff*, respectivamente.
- Os índices representam **o** – ocupados, **d** – disponíveis, **l** – liberados, **h** – *handoff*, **g** – gerados, **s** – sucesso, **b** – bloqueio e os índices auxiliares **i**,  **$i_{máx}$** , **j**, **u** e **k**.

---

### 5.7.1 - Resultados

---

- Mostramos na **FIG. 5.5** os resultados para a simulação de um processo de tráfego em uma única célula, portanto sem o procedimento de *handoff* e sem mobilidade.
- Verificamos que para uma célula com **50 canais**, taxa de geração  **$I = 0,4$**  e de duração  **$m = 0,01$**  foram atendidos **39,45 Erl** a um **GOS** de **1,9%** num período de 6 horas de simulação.
- Este resultado é muito próximo ao obtido pela fórmula de Erlang-B onde **50 canais** atendem **40,3 Erl** a **2%** de **GOS**. Perceba que a simulação tomada em um período maior tende a levar os valores de tráfego atendido aos **40 Erl** propostos pela taxa **I** como esperado.

- A **FIG. 5.6** mostra os resultados para duas células adjacentes. Tomando as mesmas condições anteriores para as duas células e uma taxa de *handoff*  $\lambda_{ij} = 0,4$  obtemos resultados semelhantes ao da fórmula de Erlang-B. Isto porque mesmo aplicando esta taxa de *handoff* considerada alta não há grande volume de mobilidade no sistema.
- Na **FIG. 5.7** apresentamos um arranjo de células e sua matriz de *handoff* desbalanceada, ou seja, as taxas de *handoff* entre duas células são diferentes. Percebemos aqui um caso mais real de sistema.
- Tomando os resultados da célula **C1** verificamos que o processo de *handoff* representa um grande ganho sistêmico já que para as mesmas condições anteriores atendemos um tráfego próximo dos **44 Erl** com um **GOS** em torno de apenas **1%**.

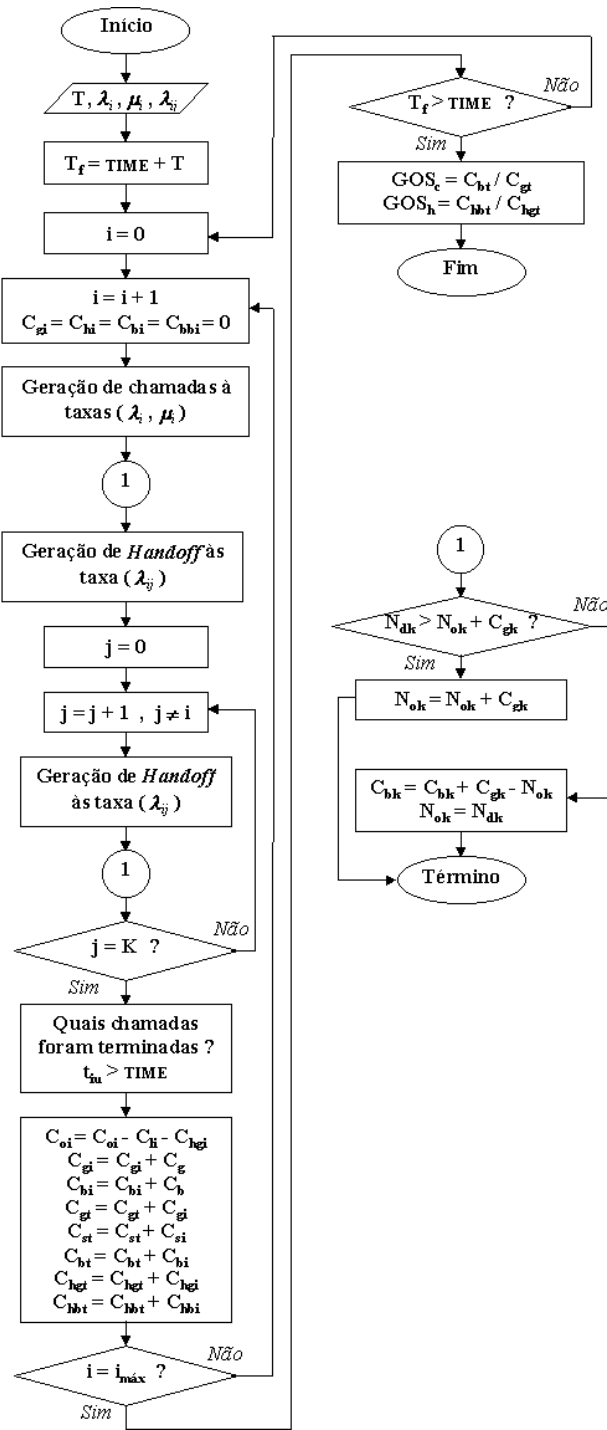


Figura 5.4 - Fluxograma de processamento de tráfego

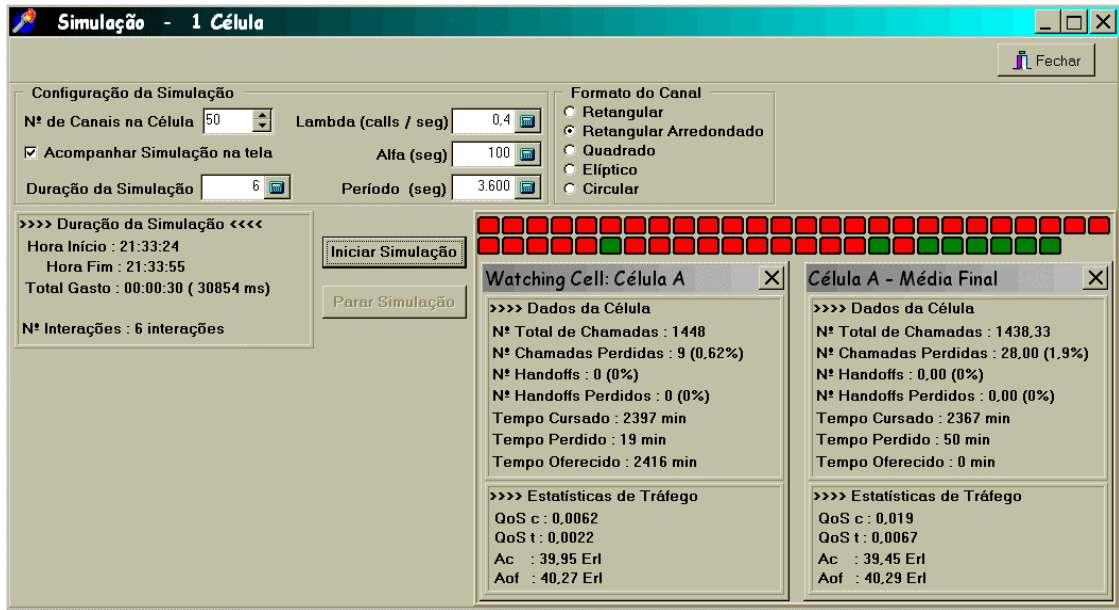


Figura 5.5 - Simulação para uma célula

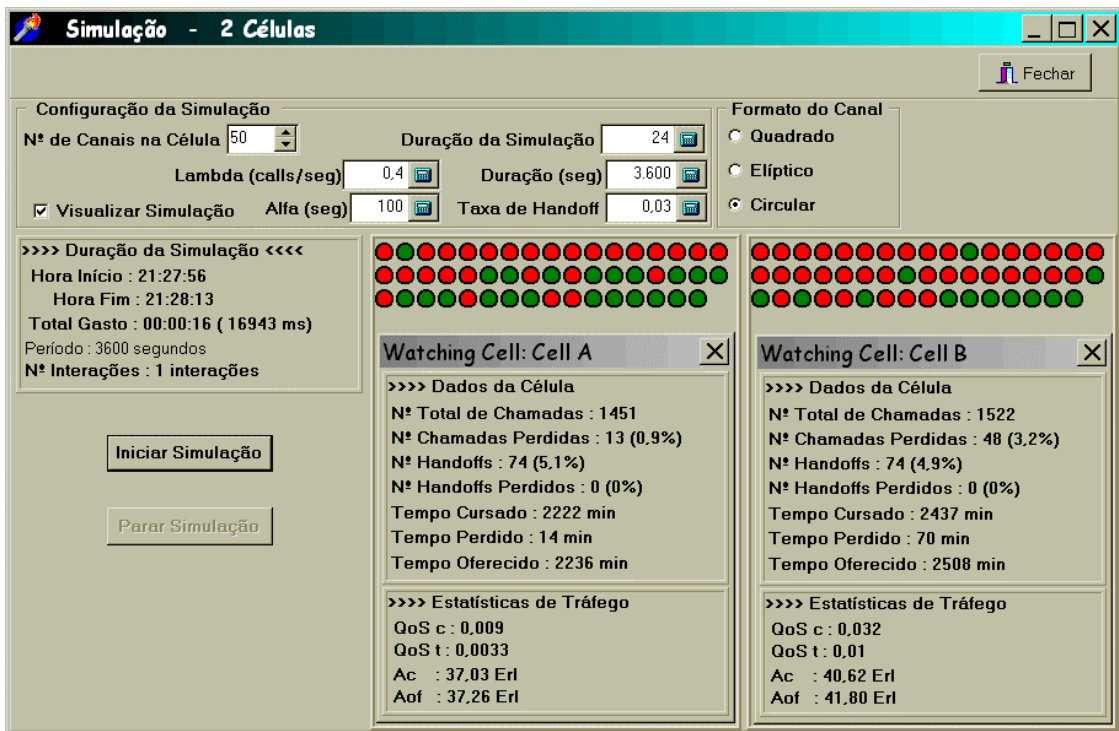


Figura 5.6 - Simulação um par de células

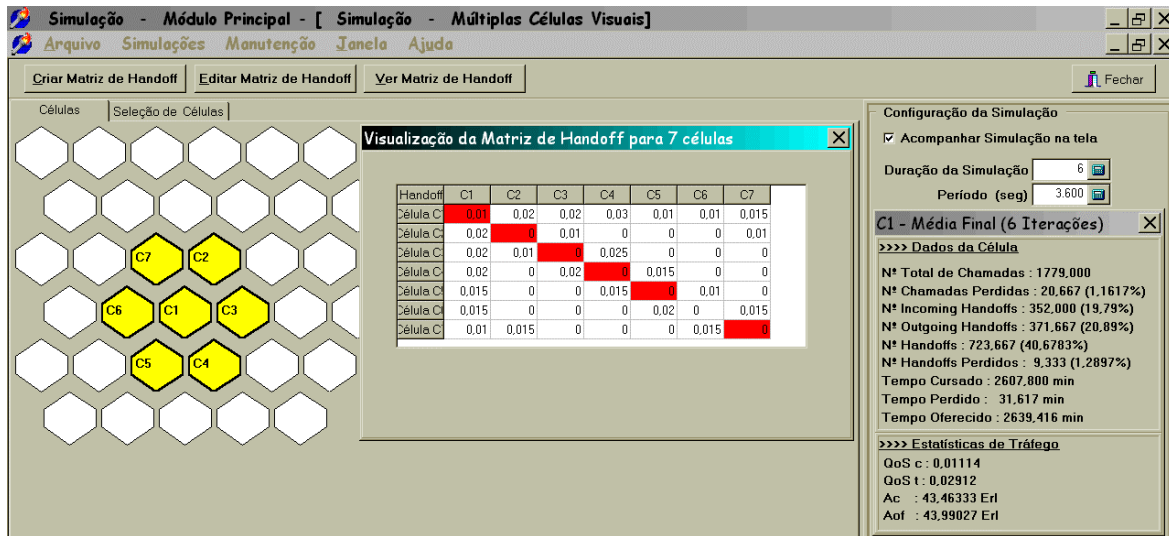


Figura 5.7 - Simulação para um conjunto de células

### 5.7.2 - Conclusões

- As distribuições de Poisson e Exponencial Negativa se mostram bem atraentes para modelar o tráfego móvel. A partir destes modelo desenvolvemos um algoritmo de simulação de tráfego em um sistema móvel celular. Discutimos na seção anterior alguns poucos resultados obtidos através de simulação.
- Em diversas condições simulação obtivemos resultados próximo aos calculados pela fórmula de Erlang-B somente para as situações de uma única célula, de sistemas com poucas células ou de sistema com baixa mobilidade, ou seja, valores muito pequenos da taxa de *handoff*.
- O algoritmo implementado mostra-se uma importante ferramenta para o planejamento de sistemas de comunicação móvel celular. Podemos simular tráfego para redimensionamento de sistemas já implantados, o que seria ainda mais preciso pelos dados reais de GOS, tráfego requerido e mobilidade do sistema.

- 
- Esta ferramenta também pode ser bem utilizada para estudos de encaminhamento alternativo de tráfego através de *handoff* forçados, para estudos de alocação flexível de canal e ainda para estudos de técnicas de controle de acesso ao meio (MAC) de diversos serviços/sistemas.

---

## **ANEXO I - Tabela de ERLANG-B**

---

Probabilidade de Bloqueio (GOS)													
N	1 %	1,2 %	1,5 %	2 %	3 %	5 %	7 %	10 %	15 %	20 %	30 %	40 %	50 %
1	0.0101	0.0121	0.0152	0.0204	0.0309	0.0526	0.0753	0.111	0.176	0.250	0.429	0.667	1.00
2	0.153	0.168	0.190	0.223	0.282	0.381	0.470	0.595	0.796	1.00	1.45	2.00	2.77
3	0.455	0.489	0.535	0.602	0.715	0.899	1.06	1.27	1.60	1.93	2.63	3.48	4.59
4	0.869	0.922	0.992	1.09	1.26	1.52	1.75	2.05	2.50	2.95	3.89	5.02	6.50
5	1.36	1.43	1.52	1.66	1.88	2.22	2.50	2.88	3.45	4.01	5.19	6.60	8.44
6	1.91	2.00	2.11	2.28	2.54	2.96	3.30	3.76	4.44	5.11	6.51	8.19	10.4
7	2.50	2.60	2.74	2.94	3.25	3.74	4.14	4.67	5.46	6.23	7.86	9.80	12.4
8	3.13	3.25	3.40	3.63	3.99	4.54	5.00	5.60	6.50	7.37	9.21	11.4	14.3
9	3.78	3.92	4.09	4.34	4.75	5.37	5.88	6.55	7.55	8.52	10.6	13.0	16.3
10	4.46	4.61	4.81	5.08	5.53	6.22	6.78	7.51	8.62	9.68	12.0	14.7	18.3
11	5.16	5.32	5.54	5.84	6.33	7.08	7.69	8.49	9.69	10.9	13.3	16.3	20.3
12	5.88	6.05	6.29	6.61	7.14	7.95	8.61	9.47	10.8	12.0	14.7	18.0	22.2
13	6.61	6.80	7.05	7.40	7.97	8.83	9.54	10.5	11.9	13.2	16.1	19.6	24.2
14	7.35	7.56	7.82	8.20	8.80	9.73	10.5	11.5	13.0	14.4	17.5	21.2	26.2
15	8.11	8.33	8.61	9.01	9.65	10.6	11.4	12.5	14.1	15.6	18.9	22.9	28.2
16	8.88	9.11	9.41	9.83	10.5	11.5	12.4	13.5	15.2	16.8	20.3	24.5	30.2
17	9.65	9.89	10.2	10.7	11.4	12.5	13.4	14.5	16.3	18.0	21.7	26.2	32.2
18	10.4	10.7	11.0	11.5	12.2	13.4	14.3	15.5	17.4	19.2	23.1	27.8	34.2
19	11.2	11.5	11.8	12.3	13.1	14.3	15.3	16.6	18.5	20.4	24.5	29.5	36.2
20	12.0	12.3	12.7	13.2	14.0	15.2	16.3	17.6	19.6	21.6	25.9	31.2	38.2
21	12.8	13.1	13.5	14.0	14.9	16.2	17.3	18.7	20.8	22.8	27.3	32.8	40.2
22	13.7	14.0	14.3	14.9	15.8	17.1	18.2	19.7	21.9	24.1	28.7	34.5	42.1
23	14.5	14.8	15.2	15.8	16.7	18.1	19.2	20.7	23.0	25.3	30.1	36.1	44.1
24	15.3	15.6	16.0	16.6	17.6	19.0	20.2	21.8	24.2	26.5	31.6	37.8	46.1
25	16.1	16.5	16.9	17.5	18.5	20.0	21.2	22.8	25.3	27.7	33.0	39.4	48.1
26	17.0	17.3	17.8	18.4	19.4	20.9	22.2	23.9	26.4	28.9	34.4	41.1	50.1
27	17.8	18.2	18.6	19.3	20.3	21.9	23.2	24.9	27.6	30.2	35.8	42.8	52.1
28	18.6	19.0	19.5	20.2	21.2	22.9	24.2	26.0	28.7	31.4	37.2	44.4	54.1
29	19.5	19.9	20.4	21.0	22.1	23.8	25.2	27.1	29.9	32.6	38.6	46.1	56.1
30	20.3	20.7	21.2	21.9	23.1	24.8	26.2	28.1	31.0	33.8	40.0	47.7	58.1
31	21.2	21.6	22.1	22.8	24.0	25.8	27.2	29.2	32.1	35.1	41.5	49.4	60.1
32	22.0	22.5	23.0	23.7	24.9	26.7	28.2	30.2	33.3	36.3	42.9	51.1	62.1
33	22.9	23.3	23.9	24.6	25.8	27.7	29.3	31.3	34.4	37.5	44.3	52.7	64.1
34	23.8	24.2	24.8	25.5	26.8	28.7	30.3	32.4	35.6	38.8	45.7	54.4	66.1
35	24.6	25.1	25.6	26.4	27.7	29.7	31.3	33.4	36.7	40.0	47.1	56.0	68.1
36	25.5	26.0	26.5	27.3	28.6	30.7	32.3	34.5	37.9	41.2	48.6	57.7	70.1
37	26.4	26.8	27.4	28.3	29.6	31.6	33.3	35.6	39.0	42.4	50.0	59.4	72.1
38	27.3	27.7	28.3	29.2	30.5	32.6	34.4	36.6	40.2	43.7	51.4	61.0	74.1
39	28.1	28.6	29.2	30.1	31.5	33.6	35.4	37.7	41.3	44.9	52.8	62.7	76.1
40	29.0	29.5	30.1	31.0	32.4	34.6	36.4	38.8	42.5	46.1	54.2	64.4	78.1
41	29.9	30.4	31.0	31.9	33.4	35.6	37.4	39.9	43.6	47.4	55.7	66.0	80.1
42	30.8	31.3	31.9	32.8	34.3	36.6	38.4	40.9	44.8	48.6	57.1	67.7	82.1
43	31.7	32.2	32.8	33.8	35.3	37.6	39.5	42.0	45.9	49.9	58.5	69.3	84.1
44	32.5	33.1	33.7	34.7	36.2	38.6	40.5	43.1	47.1	51.1	59.9	71.0	86.1
45	33.4	34.0	34.6	35.6	37.2	39.6	41.5	44.2	48.2	52.3	61.3	72.7	88.1
46	34.3	34.9	35.6	36.5	38.1	40.5	42.6	45.2	49.4	53.6	62.8	74.3	90.1
47	35.2	35.8	36.5	37.5	39.1	41.5	43.6	46.3	50.6	54.8	64.2	76.0	92.1
48	36.1	36.7	37.4	38.4	40.0	42.5	44.6	47.4	51.7	56.0	65.6	77.7	94.1
49	37.0	37.6	38.3	39.3	41.0	43.5	45.7	48.5	52.9	57.3	67.0	79.3	96.1
50	37.9	38.5	39.2	40.3	41.9	44.5	46.7	49.6	54.0	58.5	68.5	81.0	98.1
51	38.8	39.4	40.1	41.2	42.9	45.5	47.7	50.6	55.2	59.7	69.9	82.7	100.1
52	39.7	40.3	41.0	42.1	43.9	46.5	48.8	51.7	56.3	61.0	71.3	84.3	102.1
53	40.6	41.2	42.0	43.1	44.8	47.5	49.8	52.8	57.5	62.2	72.7	86.0	104.1
54	41.5	42.1	42.9	44.0	45.8	48.5	50.8	53.9	58.7	63.5	74.2	87.6	106.1
55	42.4	43.0	43.8	44.9	46.7	49.5	51.9	55.0	59.8	64.7	75.6	89.3	108.1
56	43.3	43.9	44.7	45.9	47.7	50.5	52.9	56.1	61.0	65.9	77.0	91.0	110.1
57	44.2	44.8	45.7	46.8	48.7	51.5	53.9	57.1	62.1	67.2	78.4	92.6	112.1

Probabilidade de Bloqueio (GOS)													
N	1 %	1,2 %	1,5 %	2 %	3 %	5 %	7 %	10 %	15 %	20 %	30 %	40 %	50 %
58	45.1	45.8	46.6	47.8	49.6	52.6	55.0	58.2	63.3	68.4	79.8	94.3	114.1
59	46.0	46.7	47.5	48.7	50.6	53.6	56.0	59.3	64.5	69.7	81.3	96.0	116.1
60	46.9	47.6	48.4	49.6	51.6	54.6	57.1	60.4	65.6	70.9	82.7	97.6	118.1
61	47.9	48.5	49.4	50.6	52.5	55.6	58.1	61.5	66.8	72.1	84.1	99.3	120.1
62	48.8	49.4	50.3	51.5	53.5	56.6	59.1	62.6	68.0	73.4	85.5	101.0	122.1
63	49.7	50.4	51.2	52.5	54.5	57.6	60.2	63.7	69.1	74.6	87.0	102.6	124.1
64	50.6	51.3	52.2	53.4	55.4	58.6	61.2	64.8	70.3	75.9	88.4	104.3	126.1
65	51.5	52.2	53.1	54.4	56.4	59.6	62.3	65.8	71.4	77.1	89.8	106.0	128.1
66	52.4	53.1	54.0	55.3	57.4	60.6	63.3	66.9	72.6	78.3	91.2	107.6	130.1
67	53.4	54.1	55.0	56.3	58.4	61.6	64.4	68.0	73.8	79.6	92.7	109.3	132.1
68	54.3	55.0	55.9	57.2	59.3	62.6	65.4	69.1	74.9	80.8	94.1	111.0	134.1
69	55.2	55.9	56.9	58.2	60.3	63.7	66.4	70.2	76.1	82.1	95.5	112.6	136.1
70	56.1	56.8	57.8	59.1	61.3	64.7	67.5	71.3	77.3	83.3	96.9	114.3	138.1
71	57.0	57.8	58.7	60.1	62.3	65.7	68.5	72.4	78.4	84.6	98.4	115.9	140.1
72	58.0	58.7	59.7	61.0	63.2	66.7	69.6	73.5	79.6	85.8	99.8	117.6	142.1
73	58.9	59.6	60.6	62.0	64.2	67.7	70.6	74.6	80.8	87.0	101.2	119.3	144.1
74	59.8	60.6	61.6	62.9	65.2	68.7	71.7	75.6	81.9	88.3	102.7	120.9	146.1
75	60.7	61.5	62.5	63.9	66.2	69.7	72.7	76.7	83.1	89.5	104.1	122.6	148.0
76	61.7	62.4	63.4	64.9	67.2	70.8	73.8	77.8	84.2	90.8	105.5	124.3	150.0
77	62.6	63.4	64.4	65.8	68.1	71.8	74.8	78.9	85.4	92.0	106.9	125.9	152.0
78	63.5	64.3	65.3	66.8	69.1	72.8	75.9	80.0	86.6	93.3	108.4	127.6	154.0
79	64.4	65.2	66.3	67.7	70.1	73.8	76.9	81.1	87.7	94.5	109.8	129.3	156.0
80	65.4	66.2	67.2	68.7	71.1	74.8	78.0	82.2	88.9	95.7	111.2	130.9	158.0
81	66.3	67.1	68.2	69.6	72.1	75.8	79.0	83.3	90.1	97.0	112.6	132.6	160.0
82	67.2	68.0	69.1	70.6	73.0	76.9	80.1	84.4	91.2	98.2	114.1	134.3	162.0
83	68.2	69.0	70.1	71.6	74.0	77.9	81.1	85.5	92.4	99.5	115.5	135.9	164.0
84	69.1	69.9	71.0	72.5	75.0	78.9	82.2	86.6	93.6	100.7	116.9	137.6	166.0
85	70.0	70.9	71.9	73.5	76.0	79.9	83.2	87.7	94.7	102.0	118.3	139.3	168.0
86	70.9	71.8	72.9	74.5	77.0	80.9	84.3	88.8	95.9	103.2	119.8	140.9	170.0
87	71.9	72.7	73.8	75.4	78.0	82.0	85.3	89.9	97.1	104.5	121.2	142.6	172.0
88	72.8	73.7	74.8	76.4	78.9	83.0	86.4	91.0	98.2	105.7	122.6	144.6	174.0
89	73.7	74.6	75.7	77.3	79.9	84.0	87.4	92.1	99.4	106.9	124.0	145.9	176.0
90	74.7	75.6	76.7	78.3	80.9	85.0	88.5	93.1	100.6	108.2	125.5	147.6	178.0
91	75.6	76.5	77.6	79.3	81.9	86.0	89.5	94.2	101.7	109.4	126.9	149.3	180.0
92	76.6	77.4	78.6	80.2	82.9	87.1	90.6	95.3	102.9	110.7	128.3	150.9	182.0
93	77.5	78.4	79.6	81.2	83.9	88.1	91.6	96.4	104.1	111.9	129.7	152.6	184.0
94	78.4	79.3	80.5	82.2	84.9	89.1	92.7	97.5	105.3	113.2	131.2	154.3	186.0
95	79.4	80.3	81.5	83.1	85.8	90.1	93.7	98.6	106.4	114.4	132.6	155.9	188.0
96	80.3	81.2	82.4	84.1	86.8	91.1	94.8	99.7	107.6	115.7	134.0	157.6	190.0
97	81.2	82.2	83.4	85.1	87.8	92.2	95.8	100.8	108.8	116.9	135.5	159.3	192.0
98	82.2	83.1	84.3	86.0	88.8	93.2	96.9	101.9	109.9	118.2	136.9	160.9	194.0
99	83.1	84.1	85.3	87.0	89.8	94.2	97.9	103.0	111.1	119.4	138.3	162.6	196.0
100	84.1	85.0	86.2	88.0	90.8	95.2	99.0	104.1	112.3	120.6	139.7	164.3	198.0
102	85.9	86.9	88.1	89.9	92.8	97.3	101.1	106.3	114.6	123.1	142.6	167.6	202.0
104	87.8	88.8	90.1	91.9	94.8	99.3	103.2	108.5	116.9	125.6	145.4	170.9	206.0
106	89.7	90.7	92.0	93.8	96.7	101.4	105.3	110.7	119.3	128.1	148.3	174.2	210.0
108	91.6	92.6	93.9	95.7	98.7	103.4	107.4	112.9	121.6	130.6	151.1	177.6	214.0
110	93.5	94.5	95.8	97.7	100.7	105.5	109.5	115.1	124.0	133.1	154.0	180.9	218.0
112	95.4	96.4	97.7	99.6	102.7	107.5	111.7	117.3	126.3	135.6	156.9	184.2	222.0
114	97.3	98.3	99.7	101.6	104.7	109.6	113.8	119.5	128.6	138.1	159.7	187.6	226.0
116	99.2	100.2	101.6	103.5	106.7	111.7	115.9	121.7	131.0	140.6	162.6	190.9	230.0
118	101.1	102.1	103.5	105.5	108.7	113.7	118.0	123.9	133.3	143.1	165.4	194.2	234.0
120	103.0	104.0	105.4	107.4	110.7	115.8	120.1	126.1	135.7	145.6	168.3	197.6	238.0
122	104.9	105.9	107.4	109.4	112.6	117.8	122.2	128.3	138.0	148.1	171.1	200.9	242.0
124	106.8	107.9	109.3	111.3	114.6	119.9	124.4	130.5	140.3	150.6	174.0	204.2	246.0
126	108.7	109.8	111.2	113.3	116.6	121.9	126.5	132.7	142.7	153.0	176.8	207.6	250.0
128	110.6	111.7	113.2	115.2	118.6	124.0	128.6	134.9	145.0	155.5	179.7	210.9	254.0
130	112.5	113.6	115.1	117.2	120.6	126.1	130.7	137.1	147.4	158.0	182.5	214.2	258.0
132	114.4	115.5	117.0	119.1	122.6	128.1	132.8	139.3	149.7	160.5	185.4	217.6	262.0
134	116.3	117.4	119.0	121.1	124.6	130.2	134.9	141.5	152.0	163.0	188.3	220.9	266.0
136	118.2	119.4	120.9	123.1	126.6	132.3	137.1	143.7	154.4	165.5	191.1	224.2	270.0



---

## Capítulo 6 - Teoria de antenas

---

*Este Capítulo tem por objetivo apresentar, sucintamente, a teoria e os aspectos de antenas que constituem fator de projeto em sistemas de comunicação móvel celular.*

---

### 6.1 - Antenas

---

- O conhecimento das características das antenas é fator determinante no projeto de sistemas. Apresentamos a seguir os tipos de antenas utilizadas em sistemas de comunicação móvel.
- A antena é um dispositivo transdutor de energia elétrica em energia eletromagnética e vice-versa e que pode ser qualquer estrutura de material condutor que suporte uma corrente elétrica.
- Variando a corrente elétrica com o tempo, esta estrutura irradiará uma onda eletromagnética.
- Na verdade, sua estrutura pode ser projetada para irradiar eficientemente com certas características desejáveis como polarização, ganho, frequência central e largura de faixa.
- Caso a antena não for corretamente planejada pode levar outros elementos condutores a irradiarem também, levando a interferência no sinal transmitido.
- Uma antena deve transferir potência eficientemente, a maior possível e com o mínimo de perdas. Logo sua impedância deve casar com a da linha de transmissão e os materiais devem dissipar o mínimo de calor.
- Diferentes antenas também podem ser combinadas a fim de irradiarem em direções específicas diminuindo o efeito de qualquer interferência.



Figura 6.1 - Antena log-periódica

---

## 6.2 - Espectro eletromagnético

---

- Na verdade as antenas devem ser projetadas para trabalharem em uma determinada faixa do espectro eletromagnético em torno de uma frequência central.
- O espectro eletromagnético é dividido em faixas de frequência que possuem características específicas de propagação.
- Temos que a relação entre frequência e o comprimento de onda é dada por  $\lambda = c/f$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda em metros,  $f$  é a frequência em Hertz, e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo ( $3,0 \times 10^8$  m/s).

- Assim, é fácil perceber que aplicações em frequências mais baixas necessitam de antenas de maior comprimento para que a oscilação de corrente neste material condutor deve abranger pelo menos metade de seu comprimento.
- Desta forma, classificamos as faixas de frequência como mostrado na QUADRO 6.1.

FAIXA DE FREQUÊNCIA	COMPRIMENTO DE ONDA	DESIGNAÇÃO DA FAIXA
30 Hz 300 Hz	10.000 Km 1.000 Km	ELF – Extremely Low Freq.
300 Hz 3 kHz	1.000 Km 100 Km	ELF - Extremely Low Freq.
3 kHz 30 kHz	100 Km 10 Km	VLF - Very Low Frequency
30 kHz 300 kHz	10 Km 1 Km	LF - Low Frequency
300 kHz 3 MHz	1 Km 100 m	MF - Medium Frequency
3 MHz 30 MHz	100 m 10 m	HF - High Frequency
30 MHz 300 MHz	10 m 1 m	VHF - Very High Frequency
300 MHz 3 GHz	1 m 10 cm	UHF - Ultra High Frequency
3 GHz 30 GHz	10 cm 1 cm	SHF - Super High Frequency
30 GHz 300 GHz	1 cm 10 mm	EHF - Extremely High Freq.
300 GHz 3 THz	1 mm 0,1 mm	?

Quadro 6.1 - Faixas de frequência

- Algumas destas faixas ainda são subdivididas para atender a serviços e aplicações específicas.
- Apresentamos no QUADRO 6.2 a subdivisão da faixa de SHF.

FAIXA DE FREQUÊNCIA	COMPRIMENTO DE ONDA	DESIGNAÇÃO DA FAIXA
1 GHz 2 GHz	30 cm 15 cm	<b>BANDA L</b>
2 GHz 4 GHz	15 cm 7,5 cm	<b>BANDA S</b>
4 GHz 8 GHz	7,5 cm 3,75 cm	<b>BANDA C</b>
8 GHz 12 GHz	3,75 cm 2,5 cm	<b>BANDA X</b>
12 GHz 18 GHz	2,5 cm 1,67 cm	<b>BANDA Ku</b>
18 GHz 27 GHz	1,67 cm 1,11 cm	<b>BANDA K</b>
27 GHz 40 GHz	1,11 cm 7,5 mm	<b>BANDA Ka</b>
40 GHz 300 GHz	7,5 cm 1,0 mm	<b>BANDA mm</b>

Quadro 6.2 - Sub-faixas de SHF

---

### 6.3 - Conceitos básicos

---

- Apresentamos a seguir os conceitos básicos em Teoria de Antenas. Estes conceitos constituem especificações de projeto de qualquer sistema de comunicação via rádio.
- 

#### Antena Isotrópica

- Antena que irradia uniformemente em todas as direções.

---

### Vetor de Poynting ( $P$ )

- O Vetor de *Poynting* representa o fluxo de potência eletromagnética por unidade de área ( $W/m^2$ ) na direção normal a esta área, ou seja, representa a densidade de potência em uma determinada direção.

---

### Potência Irradiada ( $W$ )

- Representa a potência irradiada que cruza uma superfície  $S$  e é calculada por:

$$W = \iint P \cdot dS \quad (6.1)$$

---

### Campo Próximo Indutivo

- É a região imediatamente em torno da antena onde o campo indutivo predomina.

---

### Campo Próximo Radiante

- É a região onde a forma do campo é função da distância e a componente radial é considerável. Também conhecida como Região de *Fresnel*.

---

### Campo Distante

- É a região onde a distribuição de campo é essencialmente transversal e a forma do campo não varia com a distância. Também denominada por Região de *Fraunhofer*.

---

### Intensidade de Radiação (U)

- É a potência irradiada por unidade de ângulo sólido e é calculada somente para o campo distante. Esta Intensidade é calculada por:

$$U = d^2 \cdot P \quad (6.2)$$

---

### Diagrama de Radiação

- Representação gráfica da distribuição espacial da energia eletromagnética em torno da antena.
- É uma variação espacial da Intensidade de Radiação  $f = U(\theta, \phi)$  geralmente normalizado pela máxima Intensidade de Radiação ( $U/U_M$ ).

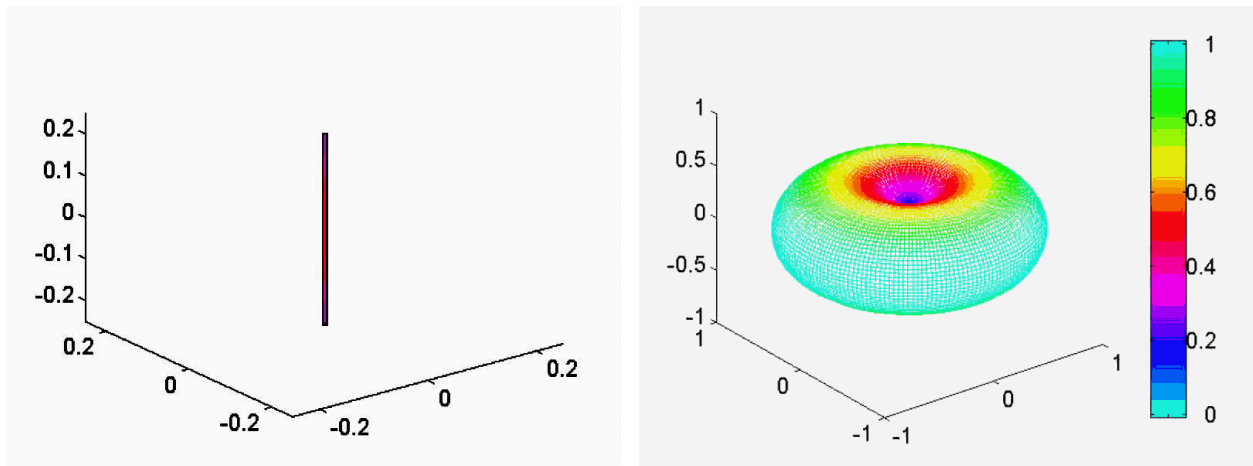


Figura 6.2 - Diagrama de radiação tridimensional de um dipolo

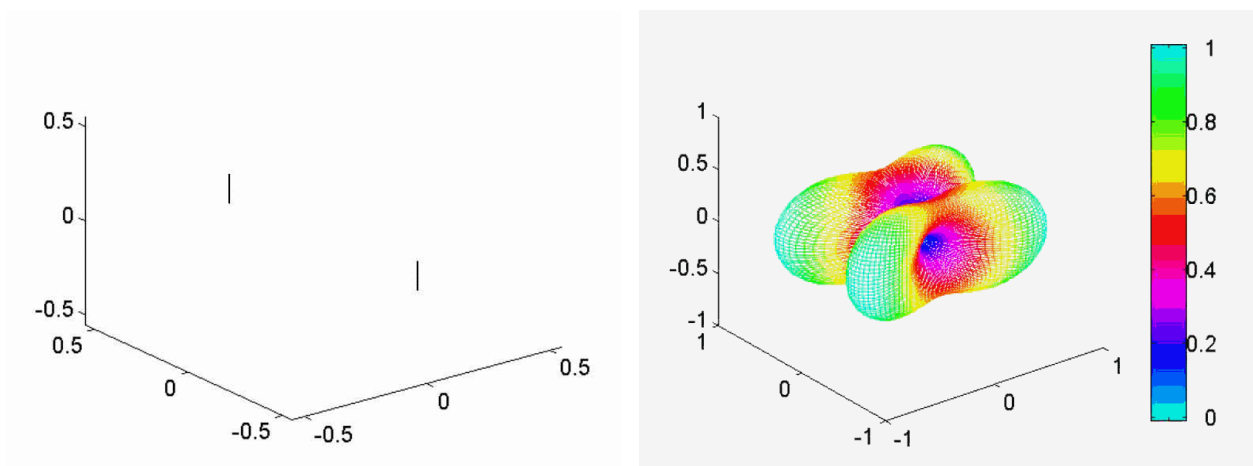


Figura 6.3 - Diagrama de radiação da combinação de antenas

### Lóbulo Principal

- É a maior região do Diagrama de Radiação (no exemplo abaixo é o ponto 0).

### Lóbulos Secundários

- Estes são as demais regiões do Diagrama de Radiação.

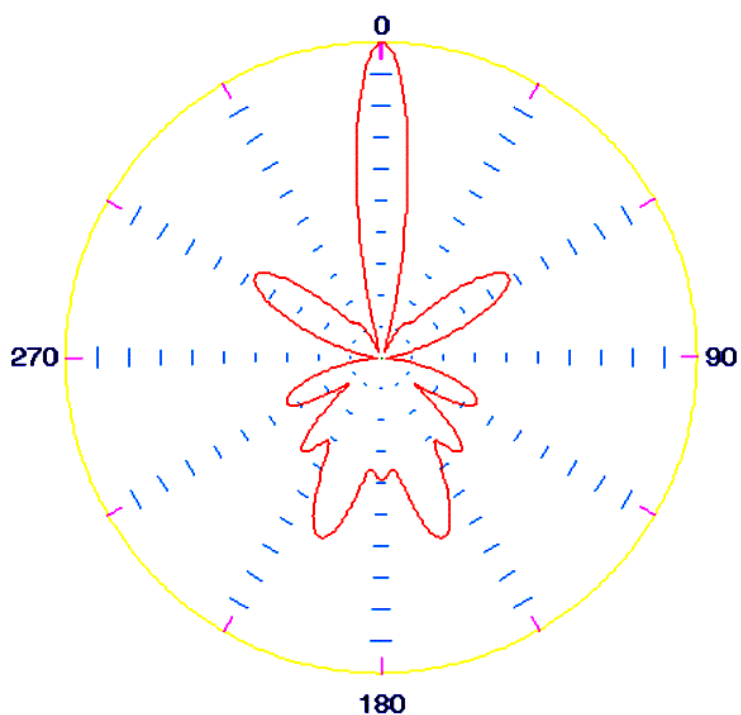


Figura 6.4 - Diagrama de radiação polar

### Diretividade

- É a relação entre a máxima Intensidade de Radiação ( $U_M$ ) da antena em questão e a Intensidade de Radiação de uma antena isotrópica ( $U_0$ ) dada por:

$$D = U_M / U_0 \quad (6.3)$$



- Na verdade, a diretividade mede a capacidade que a antena tem de concentrar energia numa dada região do espaço.

---

### Ganho

- É a relação entre a máxima Intensidade de Radiação ( $U_M$ ) da antena em questão, incluindo as perdas, e a Intensidade de Radiação de uma antena isotrópica ( $U_0$ ) na forma:

$$G = \eta U_M / U_0 \quad (6.4)$$

onde  $\eta$  é a eficiência da antena. Assim, temos que  $G = \eta \cdot D$ , ou seja, o ganho é uma medida de eficiência da diretividade.

---

### Ângulo de Meia Potência

- É o ângulo formado pelas linhas que interligam pontos de meia potência passando pelo centro dos eixos das coordenadas do Diagrama de Radiação.

---

### Abertura ou Área Equivalente

- É a relação entre a potência entregue a carga na recepção do Vetor de Poynting.
- Relação entre Área Equivalente e a Diretividade.

$$A_j \cdot D_j = A_i \cdot D_i \quad (6.5)$$

---

## Polarização

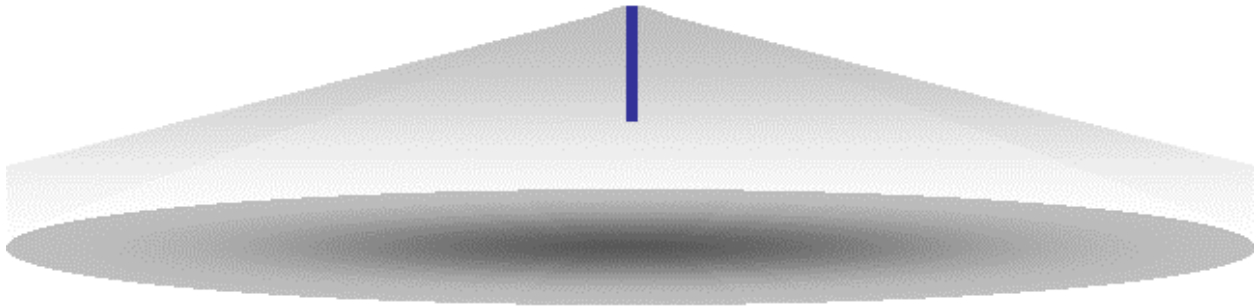
- É a oscilação no tempo do Vetor Campo Elétrico na direção do lóbulo principal.
- Neste caso, a polarização pode ser linear (horizontal ou vertical), circular ou elíptica.
- É importante notarmos que há uma atenuação de 20 dB quando o sinal é recebido com a polarização trocada.
- Isto pode ser uma vantagem para o projeto onde podemos ter dois sinais, de preferência gerados com códigos de baixa correlação, sendo transmitidos com polarização cruzada.

---

## **6.4 - Antenas omnidirecionais**

---

- Antenas omnidirecionais são aquelas irradiam em todas as direções com o mesmo ganho no plano horizontal.
- O que as diferenciam de outras antenas é o seu diagrama de irradiação no plano vertical.
- O diagrama de irradiação representa o ganho em todas as direções.



**Figura 6.5 - Cobertura por um antena omnidirecional**

- Valores de ganho típicos de antenas omnidirecionais em sistemas celulares estão normalmente entre **6 e 14 dBd**.
- Estas antenas são utilizadas na implantação dos sistemas, pois fornecem uma irradiação bem próxima do padrão hexagonal celular considerado no início do projeto, sendo também de baixo custo.
- Cada antena pode transmitir até 20 canais de RF simultaneamente. A inserção desses canais é feita através de combinadores e circuladores.
- Uma célula possui até **3 antenas de transmissão**, sendo que cada canal tem seu amplificador de potência individual. Quando o tráfego é alto, utiliza-se mais de uma antena de transmissão, chegando-se a até 6 antenas.
- Na recepção uma única antena recebe todas as portadoras que são separadas por canal em cada um dos rádio de recepção através de divisores (*splitters*). Normalmente uma antena de recepção alimenta até 32 canais de rádio, pois o uso de *splitters* degrada o nível do sinal recebido comprometendo a detecção da portadora.
- Pode-se diminuir a quantidade de antenas na ERB utilizando-se duplexadores que permitem transmissão e recepção, simultaneamente, através da mesma

antena. O duplexador combina filtros passa-faixa mantendo a unidirecionalidade dos sinais nos circuitos da ERB.

- Pelo fenômeno de desvanecimento do sinal (*fading*) tanto na recepção da EM como da ERB, podemos amenizá-lo usando de diversidade espacial de antenas.
- Geralmente utiliza-se duas antenas de recepção na ERB, separadas por uma distância para que o sinal recebido em uma delas esteja sob melhores condições que o recebido pela outra. Os sinais recebidos em cada antenas são levados ao receptor que os combina para obter um melhor sinal a ser decodificado.
- Para um bom desempenho do esquema de diversidade espacial, faz-se com que a relação entre a altura das antenas e a distância de separação entre elas seja igual a 11.
- As antenas das EM são sempre omnidirecionais e seu ganho não deve ultrapassar a **3 dBd** para não restringir o ângulo de abertura vertical, o que dificulta a transmissão nas proximidades da ERB.
- A antena deve estar localizada a uma altura acima do topo do veículo como as de teto ou de vidro disponíveis no mercado.

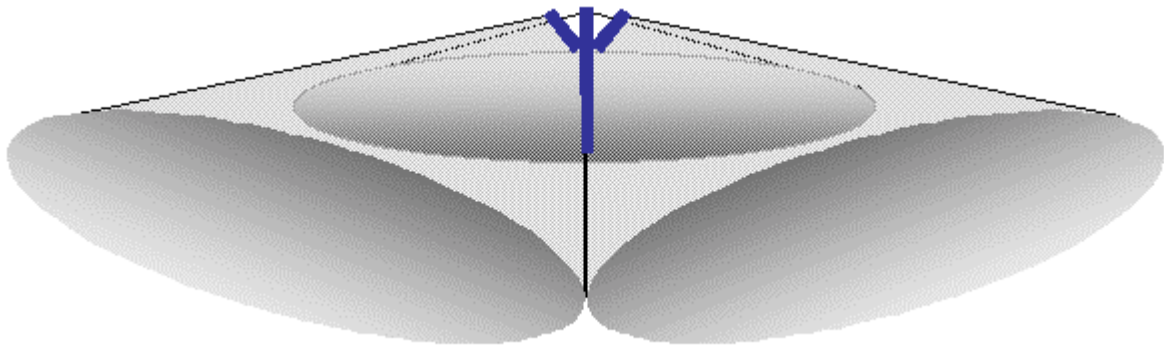
---

## 6.5 - Antenas diretivas

---

- Sabemos que ao utilizarmos o conceito de reuso de frequências, estaremos sujeitos à ocorrência de interferências.

- Para garantir o requisito de qualidade de sinal, deve-se aumentar o fator de redução de interferência do co-canal, em terrenos irregulares ou utilizar antenas diretivas.
- As mais utilizadas em sistemas celulares são as de **60°** e as de **120°** de abertura no plano horizontal de irradiação.



**Figura 6.6 - Cobertura por três antenas diretivas**

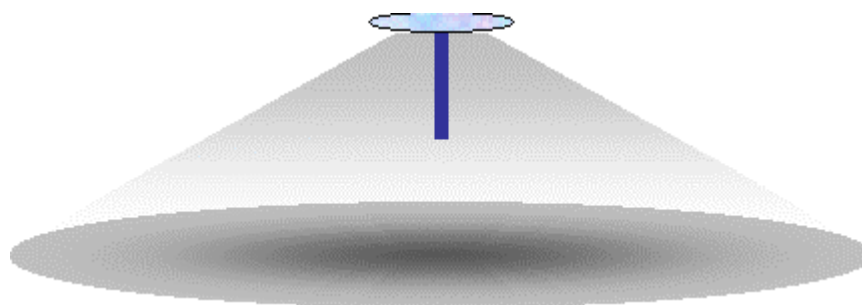
- Sistemas com fator de reuso de **7 células por cluster**, utiliza-se, normalmente, a setorização de 120°, originando 3 setores por célula e 21 subgrupos de frequências no sistema. Se o sistema possui 333 canais, por exemplo, cada célula terá cerca de 47 canais ( $333/7$ ).
- Após a setorização, cada setor teria duas antenas de recepção, para diversidade espacial, e apenas uma antena de transmissão servindo a 16 canais.
- Isto lembra que o uso de muitos setores em uma ERB causa o inconveniente de muitas antenas, pelo menos duas de recepção e uma de transmissão por setor.

---

## 6.6 - Downtilt

---

- As antenas com *downtilt* são utilizadas para confinar a energia do sinal transmitido dentro de uma área de cobertura restrita.
- Utiliza-se o **downtilt elétrico** conseguido pela modificação do feixe de maior ganho da antena no plano vertical.
- Um disco metálico no topo da antena faz com que a energia concentre-se para baixo diminuindo o alcance da antena, enquanto que seu ganho não sofre modificações.
- Usa-se também alterar a inclinação da antena no eixo vertical alterando assim seu diagrama de radiação neste eixo em relação ao solo.



•Figura 6.7 - Cobertura por uma antena com *downtilt*

---

## Fonte de pesquisa

---

- Esse material foi obtido no site <http://www.eee.ufg.br/~lguedes/cm/cm.thm>, site do Professor Doutor Leonardo Guerra de Rezende Guedes, professor da Universidade Federal de Goiás, na Escola de Engenharia Elétrica.
- Nossa participação constou de uma revisão no texto capturado via Internet e sua formatação dentro dos padrões para textos técnicos segundo as Normas da ABNT. Procurou-se manter o mais fiel possível o *layout* apresentado na *home page*.

**CEFET – MG**

**CURSO DE  
ELETRÔNICA**

**UNIDADE 11**

**COMUNICAÇÕES  
MÓVEIS**

**Wander - 2003**