

EletroÔnica

Habilitação técnica em

EletroÔnica

5

Telecomunicações

CENTRO PAULA SOUZA

GOVERNO DE
SÃO PAULO



CENTRO PAULA SOUZA DO GOVERNO DE SÃO PAULO



CENTRO PAULA SOUZA



Eletrônica

Volume 5



CENTRO PAULA SOUZA



Eletrônica

Telecomunicações

Álvaro Gomes de Carvalho

Luiz Fernando da Costa Badinhan

(autores)

Edson Horta

(coautor)



2011



Presidência
João Sayad
Vice-presidência
Ronaldo Bianchi, Fernando Vieira de Mello

DIRETORIA DE PROJETOS EDUCACIONAIS

Direção: Fernando José de Almeida
Gerência: Monica Gardelli Franco, Júlio Moreno
Coordenação Técnica: Maria Luiza Guedes
Equipe de autoria Centro Paula Souza
Coordenação geral: Ivone Marchi Lainetti Ramos
Coordenação da série Eletrônica: Jun Suzuki
Autores: Álvaro Gomes de Carvalho, Luiz Fernando da Costa Badinhan
Coautor: Edson Horta
Revisão técnica: Rafael Rezende Savi
Equipe de Edição
Coordenação geral: Carlos Tabosa Seabra, Rogério Eduardo Alves

Coordenação editorial: Luiz Marin
Edição de texto: Roberto Matajs
Secretário editorial: Antonio Mello
Revisão: Conexão Editorial
Direção de arte: Bbox Design
Diagramação: LCT Tecnologia
Ilustrações: Nilson Cardoso
Pesquisa iconográfica: Completo Iconografia
Capa:
Fotografia: Eduardo Pozella, Carlos Piratininga
Tratamento de imagens: Sidnei Testa
Abertura capítulos: © Lize Streeter/Dorling Kindersley/
Getty Images

O Projeto Manual Técnico Centro Paula Souza – Coleção Técnica Interativa oferece aos alunos da instituição conteúdo relevante à formação técnica, à educação e à cultura nacional, sendo também sua finalidade a preservação e a divulgação desse conteúdo, respeitados os direitos de terceiros.

O material apresentado é de autoria de professores do Centro Paula Souza e resulta de experiência na docência e da pesquisa em fontes como livros, artigos, jornais, internet, bancos de dados, entre outras, com a devida autorização dos detentores dos direitos desses materiais ou contando com a permissibilidade legal, apresentando, sempre que possível, a indicação da autoria/crédito e/ou reserva de direitos de cada um deles.

Todas as obras e imagens expostas nesse trabalho são protegidas pela legislação brasileira e não podem ser reproduzidas ou utilizadas por terceiros, por qualquer meio ou processo, sem expressa autorização de seus titulares.

Agradecemos as pessoas retratadas ou que tiveram trechos de obras reproduzidas neste trabalho, bem como a seus herdeiros e representantes legais, pela colaboração e compreensão da finalidade desse projeto, contribuindo para que essa iniciativa se tornasse realidade. Adicionalmente, colocamo-nos à disposição e solicitamos a comunicação, para a devida correção, de quaisquer equívocos nessa área porventura cometidos em livros desse projeto.

O Projeto Manual Técnico Centro Paula Souza – Coleção Técnica Interativa, uma iniciativa do Governo do Estado de São Paulo, resulta de um esforço colaborativo que envolve diversas frentes de trabalho coordenadas pelo Centro Paula Souza e é editado pela Fundação Padre Anchieta. A responsabilidade pelos conteúdos de cada um dos trabalhos/textos inseridos nesse projeto é exclusiva do autor. Respeitam-se assim os diferentes enfoques, pontos de vista e ideologias, bem como o conhecimento técnico de cada colaborador, de forma que o conteúdo exposto pode não refletir as posições do Centro Paula Souza e da Fundação Padre Anchieta.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Bibliotecária Silvia Marques CRB 8/7377)

C331

Carvalho, Álvaro Gomes de
Eletrônica: telecomunicações / Álvaro Gomes de Carvalho, Luiz Fernando da Costa Badinhan (autores); Edson Horta (coautor);
Rafael Rezende Savi (revisor); Jun Suzuki (coordenador). -- São Paulo:
Fundação Padre Anchieta, 2011 (Coleção Técnica Interativa. Série Eletrônica, v. 5)

Manual técnico Centro Paula Souza

ISBN 978-85-8028-049-4

I. Eletrônica 2. Telecomunicações I. Badinhan, Luiz Fernando da Costa II. Horta, Edson III. Savi, Rafael Rezende IV. Suzuki, Jun V. Título



GOVERNADOR
Geraldo Alckmin

VICE-GOVERNADOR
Guilherme Afif Domingos

SECRETÁRIO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Paulo Alexandre Barbosa

CENTRO PAULA SOUZA

Presidente do Conselho Deliberativo
Yolanda Silvestre

Diretora Superintendente
Laura Laganá

Vice-Diretor Superintendente
César Silva

Chefe de Gabinete da Superintendência
Elenice Belmonte R. de Castro

Coordenadora da Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa
Helena Gemignani Peterossi

Coordenador do Ensino Superior de Graduação
Angelo Luiz Cortelazzo

Coordenador de Ensino Médio e Técnico
Almério Melquíades de Araújo

Coordenadora de Formação Inicial e Educação Continuada
Clara Maria de Souza Magalhães

Coordenador de Desenvolvimento e Planejamento
João Carlos Paschoal Freitas

Coordenador de Infraestrutura
Rubens Goldman

Coordenador de Gestão Administrativa e Financeira
Armando Natal Maurício

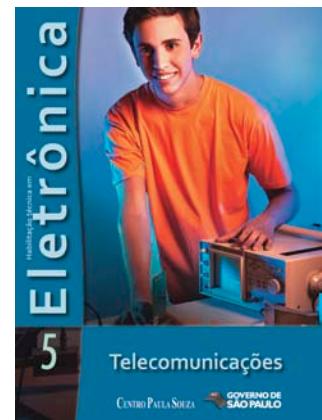
Coordenador de Recursos Humanos
Elio Lourenço Bolzani

Assessora de Comunicação
Gleise Santa Clara

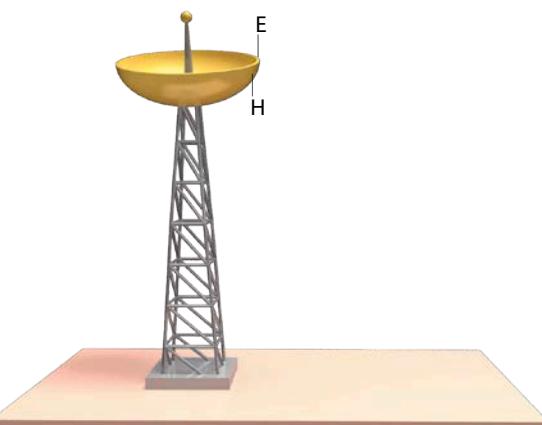
Procurador Jurídico Chefe
Benedito Libério Bergamo

Sumário

19 Capítulo I	
Conceitos básicos em sistemas de comunicação	
I.1 Histórico	20
I.2 Sistema de comunicação.....	21
I.3 Enlace de comunicação.....	22
I.4 Sinais elétricos em telecomunicações	24
I.5 Unidades de medida em telecomunicações.....	26
I.5.1 Decibel (dB)	27
I.5.2 Néper (Np)	27
I.5.3 Nível de potência (dBm)	28
I.5.4 Nível de tensão (dBu)	30
I.5.5 Relação entre dBm e dBu	31
I.5.6 O dBV.....	32
I.5.7 Nível relativo (dB _r)	32
I.5.8 O dBm ₀	33
35 Capítulo 2	
Canais de comunicação	
2.1 Definição.....	36
2.2 Tipos de canais.....	36
2.2.1 Canal fio	36
2.2.2 Canal rádio.....	37
2.2.3 Canal fibra óptica.....	37
2.3 Propriedades dos canais de comunicação	38
2.3.1 Atenuação.....	38
2.3.2 Limitação por largura de faixa	39
2.3.3 Retardo ou delay	39
2.4 Distúrbios nos canais de comunicação	40
2.4.1 Ruído elétrico	40
2.4.2 Distorção do sinal	42
2.4.3 Sinais interferentes ou espúrios.....	42
43 Capítulo 3	
Ondas de rádio	
3.1 Definição.....	44
3.2 Natureza da onda de rádio	44
3.2.1 Comprimento de onda (λ)	45
3.2.2 Frequência (f)	45
3.2.3 Relação entre λ e f	45
3.2.4 Polarização	46
3.3 Distúrbios específicos de radiocomunicações.....	47
3.3.1 Ondas de multipercorso.....	47
3.3.2 Desvanecimento.....	47
3.3.3 Ação da chuva	48
3.3.4 Efeito Doppler	48
3.3.5 Dutos	48
49 Capítulo 4	
Modulação do sinal da informação	
4.1 Modulação em amplitude (AM – <i>amplitude modulation</i>)	50
4.1.1 AM-DSB (<i>amplitude modulation – double side band</i>)	50
4.1.2 AM-DSB/SC (<i>amplitude modulation – double side band/suppressed carrier</i>)	56



Capa: Guilherme Gustavo Marangoni Porto, aluno do Centro Paula Souza
Foto: Eduardo Pozella e Carlos Piratininga



Sumário



ZWOLA FASOLA /SHUTTERSTOCK

87 Capítulo 5	
Radiopropagação	
5.1 Espectro de frequências	88
5.2 Modos de propagação	92



GEORGIOS ALEXANDRIS /SHUTTERSTOCK

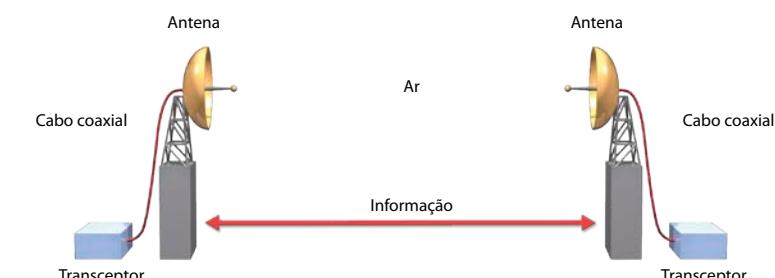
4.1.3 AM-SSB (<i>amplitude modulation – single side band</i>)	59
4.1.4 AM-VSB (<i>amplitude modulation – vestigial side band</i>)	59
4.2 Modulação angular	59
4.3 FM faixa estreita.....	60
4.4 Modulação digital	65
4.4.1 Modulação ASK (<i>amplitude shift keying</i>)	66
4.4.2 Modulação FSK (<i>frequency shift keying</i>)	67
4.4.3 Modulação PSK (<i>phase shift keying</i>)	67
4.4.4 Modulação QAM (<i>quadrature amplitude modulation</i>)	68
4.4.5 Cálculo da largura de banda.....	74
4.4.6 Detecção de sinais binários	75
4.4.7 Técnicas de recuperação da portadora ..	79
4.4.8 Codificação/decodificação diferencial ..	80
4.4.9 Desempenho quanto a erro (TEB)	82
4.4.10 Erro na codificação Gray	84
4.4.11 Dados para comparação entre sistemas de modulação.....	85

5.3 Características da atmosfera e superfície terrestres	92
5.4 A superfície terrestre.....	94
5.5 Tipos de ondas transmitidas	95
5.5.1 Onda terrestre	95
5.5.2 Onda celeste.....	97
5.5.3 Fatores de degradação de sinais em radiopropagação.....	99
5.6 Enlace em visibilidade	100
5.6.1 Zonas de Fresnel	102
5.6.2 Reflexão do feixe de micro-ondas.....	106
5.7 Potência do sinal recebido	108

109 Capítulo 6

Antenas

6.1 Definição.....	110
6.2 Diagrama de irradiação	111
6.3 Antena isotrópica.....	112
6.4 Polarização	113
6.5 Largura de feixe α	113
6.6 Eficiência η	113
6.7 Diretividade	114
6.8 Ganho da antena	115
6.9 Relação frente-costas.....	115
6.10 EIRP (<i>effective isotropic radiation power</i>)	115



Sumário

6.II Tipos de antenas	I15
6.II.1 Antena dipolo	I15
6.II.2 Antena dipolo de meia onda	I16
6.II.3 Antena dipolo dobrado	I16
6.II.4 Antena dipolo de quarto de onda	I17
6.II.5 Antena Yagi-Uda	I17
6.II.6 Antena parabólica	I21

I25 Capítulo 7

Linhas de transmissão

7.1 Definição.....	I26
7.2 Características de uma linha de transmissão ..	I28
7.3 Casamento de impedâncias	I29
7.3.1 Taxa de onda estacionária (SWR – <i>standing wave ratio</i>)	I30
7.3.2 Coeficiente de reflexão	I30
7.3.3 Métodos de casamento de impedâncias ..	I31

I33 Capítulo 8

Redes telefônicas

8.1 Sinal de voz em telefonia	I35
8.2 Aparelho telefônico	I36
8.2.1 Transdutores	I36
8.2.2 Campainha	I37
8.2.3 Híbrida	I37
8.2.4 Teclado	I38
8.3 Central e rede telefônicas	I39
8.4 Estrutura da rede telefônica.....	I43

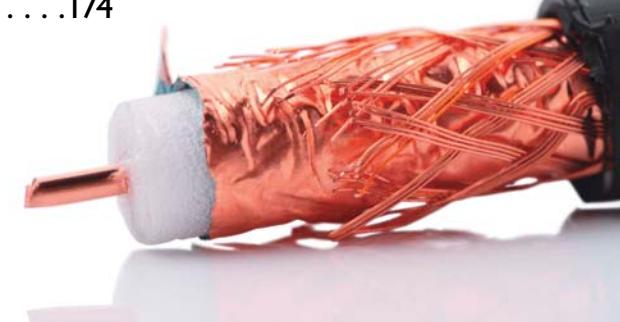
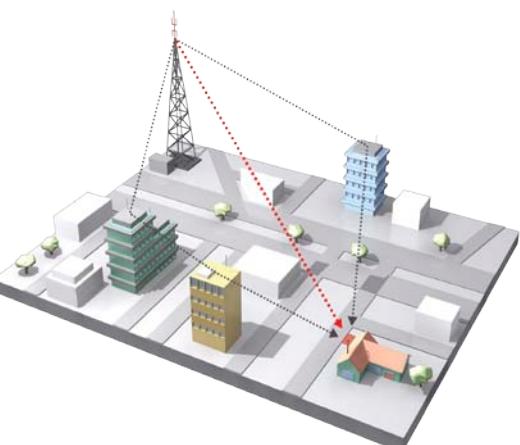
8.5 Tarifação	I45
8.5.1 Tarifação por multimedicação	I45
8.5.2 Tarifação por bilhetagem automática....	I46
8.6 Plano de numeração.....	I47
8.7 Sinalização telefônica	I51
8.7.1 Sinalização acústica	I51
8.7.2 Sinalização de linha	I52
8.7.3 Tipos de sinais de linha.....	I52
8.7.4 Protocolos de sinalização de linha	I53
8.7.5 Sinalização de registro	I55
8.7.6 Sinalização associada a canal.....	I56
8.7.7 Sinalização por canal comum	I56

I61 Capítulo 9

Multiplexação de canais

9.1 Multiplexação por divisão em frequência.....	I63
9.2 Multiplexação por divisão no tempo	I64
9.2.1 Modulação por amplitude de pulso (PAM)	I64
9.2.2 Modulação por código de pulso (PCM)	I64
9.3 Amostragem	I67
9.4 Compressão e expansão	I68
9.5 Quantização	I71
9.6 Codificação/decodificação	I71
9.7 Estrutura do sinal na linha	I74

RA3RN/SHUTTERSTOCK



Sumário

179 Capítulo 10

Redes de transporte de dados

10.1 Rede PDH (hierarquia digital plesiócrona)	180
10.2 Rede SDH (hierarquia digital síncrona)	181
10.2.1 Capacidade de transporte da SDH	183
10.2.2 Módulo de transporte síncrono (STM)	183
10.2.3 Estrutura de quadro do STM-I	184
10.2.4 Princípios de transporte e multiplexação na rede SDH	185
10.2.5 Mapeamento de sinais na SDH	187
10.3 Modelo da rede de transporte.	188
10.4 Arquiteturas SDH.	189
10.4.1 Rede ponto a ponto	189
10.4.2 Rede em anel	190



SMART7 / SHUTTERSTOCK

193 Capítulo 11

Comunicações ópticas

II.1 Vantagens das fibras ópticas	194
II.2 Composição do sistema óptico	195
II.3 Fibras ópticas	198
II.4 Dispersão nas fibras ópticas	201
II.5 Atenuação	202
II.6 Tipos de fibra óptica	203
II.7 Fibras de última geração	205
II.8 Cabos ópticos	206
II.9 Isolador óptico	208
II.10 Redes fotônicas	208

II.II Multiplexação em comprimento de onda (WDM)	211
II.I2 Anexos.	214

215 Capítulo 12

Telefonia móvel celular

I2.1 Estrutura celular	217
I2.I.1 Estação rádio base (ERB)	219
I2.I.2 Estação móvel	220
I2.I.3 Central de comutação móvel (MSC)	221
I2.2 Arquiteturas do sistema celular.	222
I2.3 Características do sistema celular	222
I2.4 Técnicas de múltiplo acesso	224
I2.4.1 Tecnologia FDMA	224
I2.4.2 Tecnologia TDMA	225
I2.4.3 Tecnologia CDMA	226
I2.5 Padrão IS-95	227
I2.6 Sistema GSM.	228
I2.6.1 Canais do GSM	228
I2.7 Transmissão de informações no sistema GSM	231
I2.7.1 Transmissão descontínua	232
I2.7.2 Recepção descontínua	232
I2.7.3 Criptografia	232
I2.7.4 Timing variável e controle de potência	232
I2.8 Modulação do sistema GSM.	232
I2.9 Frequências utilizadas no sistema GSM	233



DJG13 / SHUTTERSTOCK



DENIROKOTO / SHUTTERSTOCK

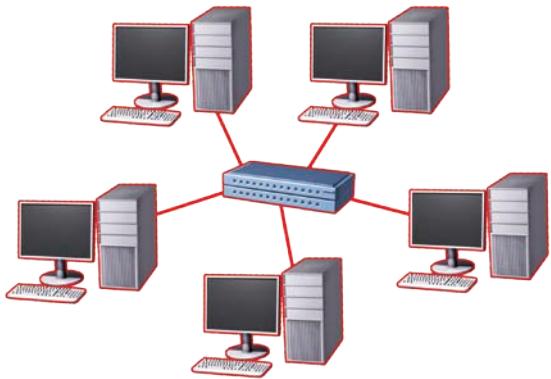
Sumário

I2.10 Arquitetura da rede GSM.....	233	I3.11 Acessórios de <i>hardware</i>	262
I2.10.1 Estação móvel.....	233	I3.12 Arquiteturas de rede.....	263
I2.10.2 Subsistema da estação base (BSS) ..	234	I3.13 Implementação da internet.....	264
I2.10.3 Sistema de comutação de rede (NSS)	234	I3.13.1 Arquitetura TCP/IP.....	265
I2.11 Handover.....	235	I3.14 Tradução de nomes em endereços IP	269
I2.12 Transmissão de dados na rede GSM	236	I3.15 Cabeamento estruturado	269
I2.13 Terceira geração celular (3G)	237	I3.15.1 Limites de distância.....	270
I2.13.1 Migração para a rede 3G	239	I3.15.2 Preparação do cabo	272
I2.13.2 WCDMA	239	I3.15.3 Instalação do cabo	273
I2.13.3 CDMA 2000.....	240	I3.15.4 <i>Patch panels</i>	273
I2.13.4 UMTS	241		
I2.14 Bluetooth.....	243		

245 Capítulo 13

Redes de computadores

I3.1 Comunicação entre computadores	247
I3.2 Meios de transmissão	249
I3.2.1 Transmissão via cabos	250
I3.2.2 Transmissão via espaço livre	250
I3.3 Soluções abertas e fechadas de redes de comunicação de dados	251
I3.4 Conexão física.....	251
I3.5 Codificação dos dados	253
I3.6 Protocolos de comunicação.....	254
I3.7 Métodos de detecção de erros	255
I3.8 Modelo OSI de arquitetura	256
I3.9 Topologias de redes	258
I3.10 Análises de velocidade e topologia.....	261



275 Referências bibliográficas

WIKIMEDIA.ORG



Capítulo I

Conceitos básicos em sistemas de comunicação

A telefonia também ampliou a forma de comunicação, ou seja, ela acontece sem fio e sem fronteiras. O telefone deixou de ser um simples aparelho para falarmos e passou a ser um computador em tamanho reduzido. Além de utilizarmos o telefone para falar a longas distâncias, podemos usar a internet associada à tecnologia **VoIP**. As novas tecnologias estão mudando o modo de nos comunicarmos.

Sigla de Voice over Internet Protocol (voz sobre IP)

1.1 Histórico

Telecomunicações pode ser definida como a transmissão de informações entre pontos distantes, por meio de sistemas eletrônicos e meios físicos. Seu desenvolvimento ocorreu de maneira gradativa, impulsionado por invenções como:

- O telégrafo, em 1844, por Samuel Morse (1791-1872), utilizado pela primeira vez para transmitir mensagens por código Morse entre as cidades de Washington e Baltimore, nos Estados Unidos.
- O telefone, em 1876, por Alexander Graham Bell (1847-1922), capaz de transmitir a voz de modo inteligível usando sinais elétricos por fios condutores.
- O rádio, em 1895, por Marchese Guglielmo Marconi (1874-1937), aparelho que transmite sinais telegráficos sem fios condutores.
- O telefone celular, em 1956, por técnicos da empresa Ericsson, modelo que ficou conhecido como MTA (Mobile Telephony A).
- O satélite artificial Sputnik, lançado em 1957.
- O satélite de comunicações Telstar, em 1962, que permitiu a transmissão de conversações telefônicas, telefoto e sinais de televisão em cores.
- A rede Arpanet, depois chamada de internet, em 1969, pelo governo dos Estados Unidos, para a comunicação entre instituições de pesquisa norte-americanas.

Até meados dos anos 1990, a telefonia fixa foi o meio de comunicação mais utilizado para troca de informações entre usuários distantes. Nessa mesma década, com o popularização da internet e da telefonia celular, ocorreu uma revolução não apenas tecnológica, mas também cultural, na forma como as pessoas passaram a trocar informações.

Hoje, se for conveniente, não precisamos mais sair de casa para fazer compras, pagar uma conta ou ler um jornal. Graças ao desenvolvimento das telecomunicações, temos a notícia em tempo real, podemos conhecer lugares distantes, aprender outras culturas, fazer novos amigos, tudo isso sem sair da frente da tela do computador. Quem imaginaria ser possível escrever uma “carta” que em poucos segundos chega ao destinatário? O *e-mail* é capaz disso.

1.2 Sistema de comunicação

Para que haja comunicação entre pelo menos dois pontos, são necessários basicamente:

- Informação: voz, imagem e dados.
- Alguém ou algo que transmite a informação: terminal fonte.
- Alguém ou algo capaz de receber a informação: terminal destino.
- Um meio físico para transmitir a informação: canal de comunicação.

Esse conjunto de elementos para estabelecer uma comunicação é denominado **sistema de comunicação**. A rede de telefonia e a internet permitem a troca de informações diversas entre usuários, utilizando terminais tecnicamente compatíveis com cada sistema. O diagrama da figura 1.1 representa um sistema de comunicação analógico elementar.

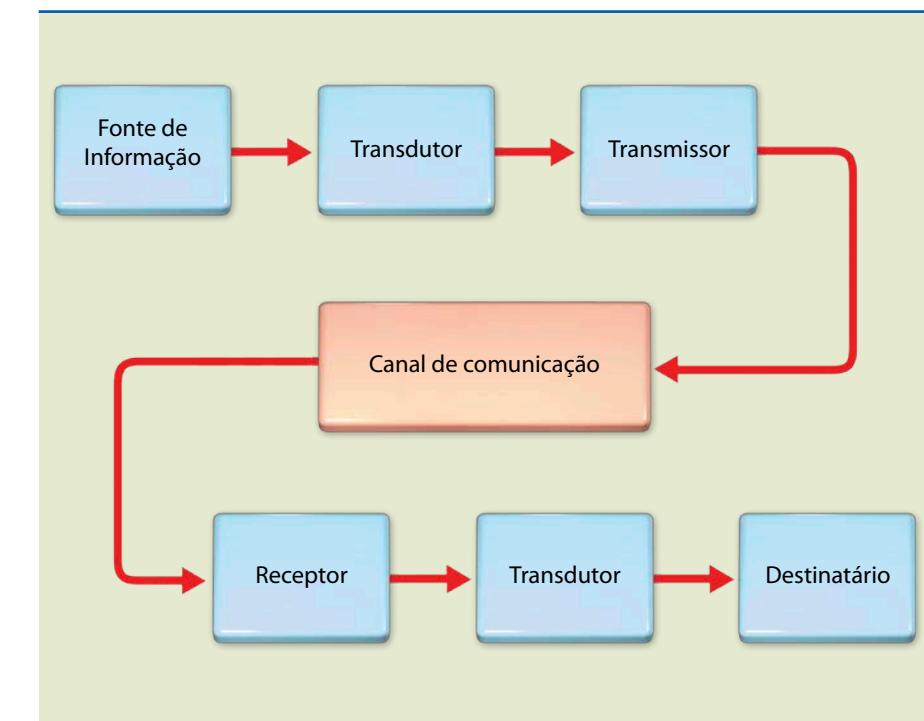


Figura 1.1
Diagrama de sistema de comunicação analógico elementar.

Cada um desses estágios tem funções específicas no sistema de comunicação:

- **Fonte de informação** – Gera a informação. Ex.: um locutor narrando um jogo de futebol ou uma pessoa falando ao telefone.

- **Transdutor da transmissão** – Converte um tipo de energia em outra. Ex.: microfone, que converte as ondas sonoras da voz em sinais elétricos, e câmera de vídeo, que converte a imagem em sinais elétricos.
- **Transmissor (Tx)** – Fornece a potência necessária para amplificar o sinal elétrico, a fim de que ele percorra longas distâncias, uma vez que sua energia vai se perdendo ao longo da transmissão pelo canal de comunicação (fios elétricos ou espaço livre) até ao receptor. Também é responsável pelos processos de modulação e codificação, que serão detalhados nos próximos capítulos.
- **Canal de comunicação** – É o meio físico entre o transmissor e o receptor, pelo qual transitam os sinais elétricos ou eletromagnéticos da informação. Ex.: par trançado, fibra óptica, cabo coaxial, espaço livre.
- **Receptor (Rx)** – Recebe os sinais da informação, faz sua demodulação e decodificação e o direciona ao transdutor da recepção.
- **Transdutor da recepção** – Converte os sinais da informação em imagem, som, texto etc. Ex.: alto-falante e tela de TV.
- **Destinatário** – É aquele a quem a mensagem se destina. Ex.: o ouvinte de uma rádio ou o telespectador de uma emissora de TV.

Exemplos de sistemas de comunicação:

- Telefonia móvel celular.
- Sistema de comunicação via satélite.
- Sistema de rádio ponto a ponto em micro-ondas.
- Sistemas UHF e VHF de televisão.
- Redes ópticas de comunicação.

I.3 Enlace de comunicação

Enlace ou *link* de comunicação é o estabelecimento de comunicação entre pelo menos dois pontos. Sua classificação obedece a três características principais:

- Número de pontos envolvidos.
- Sentido de transmissão.
- Mobilidade.

Quanto ao número de pontos envolvidos:

a) Enlace ponto a ponto (figura 1.2).

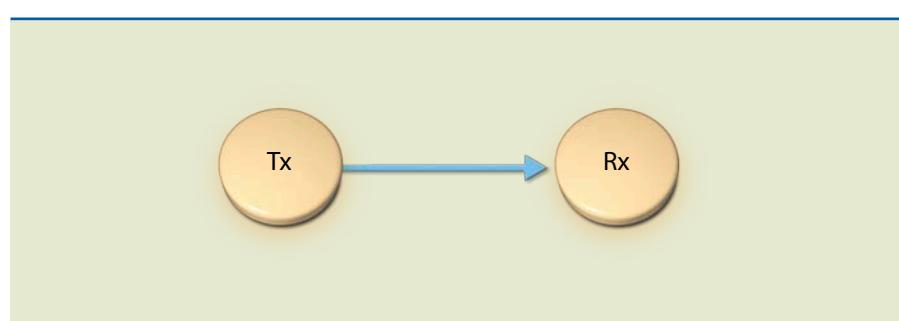


Figura 1.2

Enlace ponto a ponto.

b) Enlace ponto-multiponto (figura 1.3).

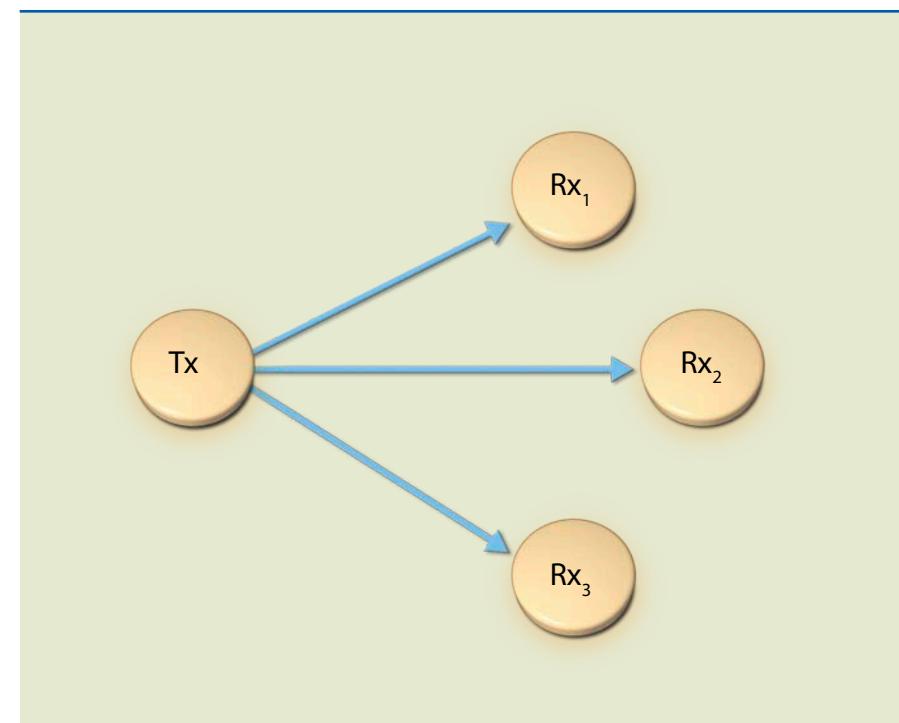


Figura 1.3

Enlace ponto-multiponto.

c) Enlace multiponto-ponto (figura 1.4).

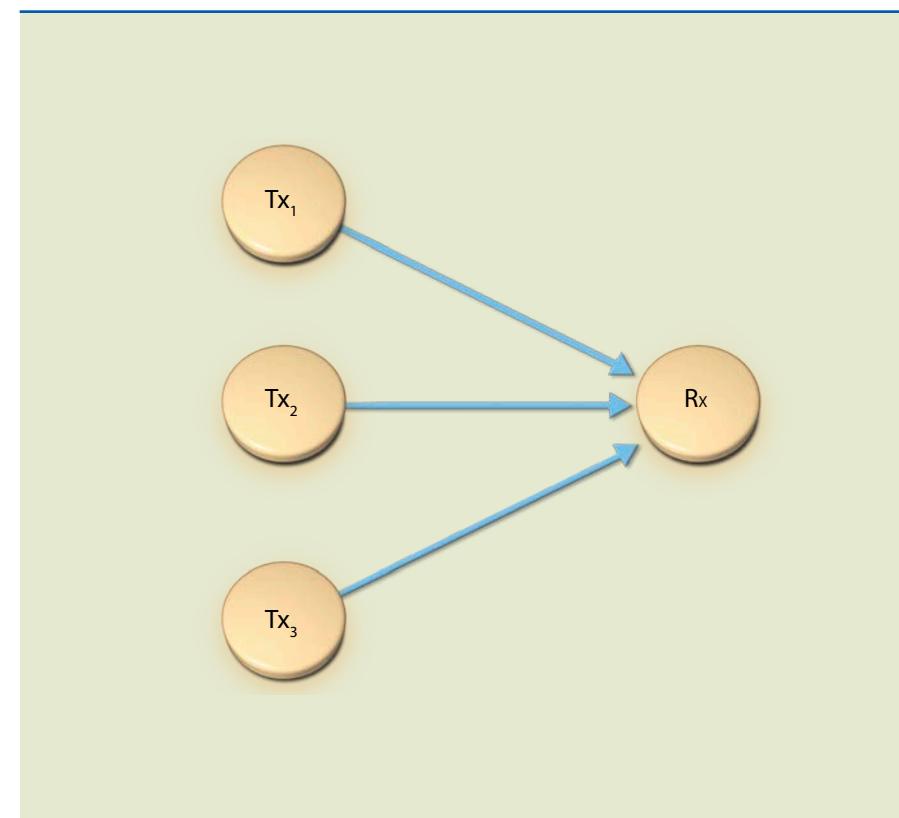


Figura 1.4

Enlace multiponto-ponto.

d) Enlace multiponto-multiponto (figura 1.5).

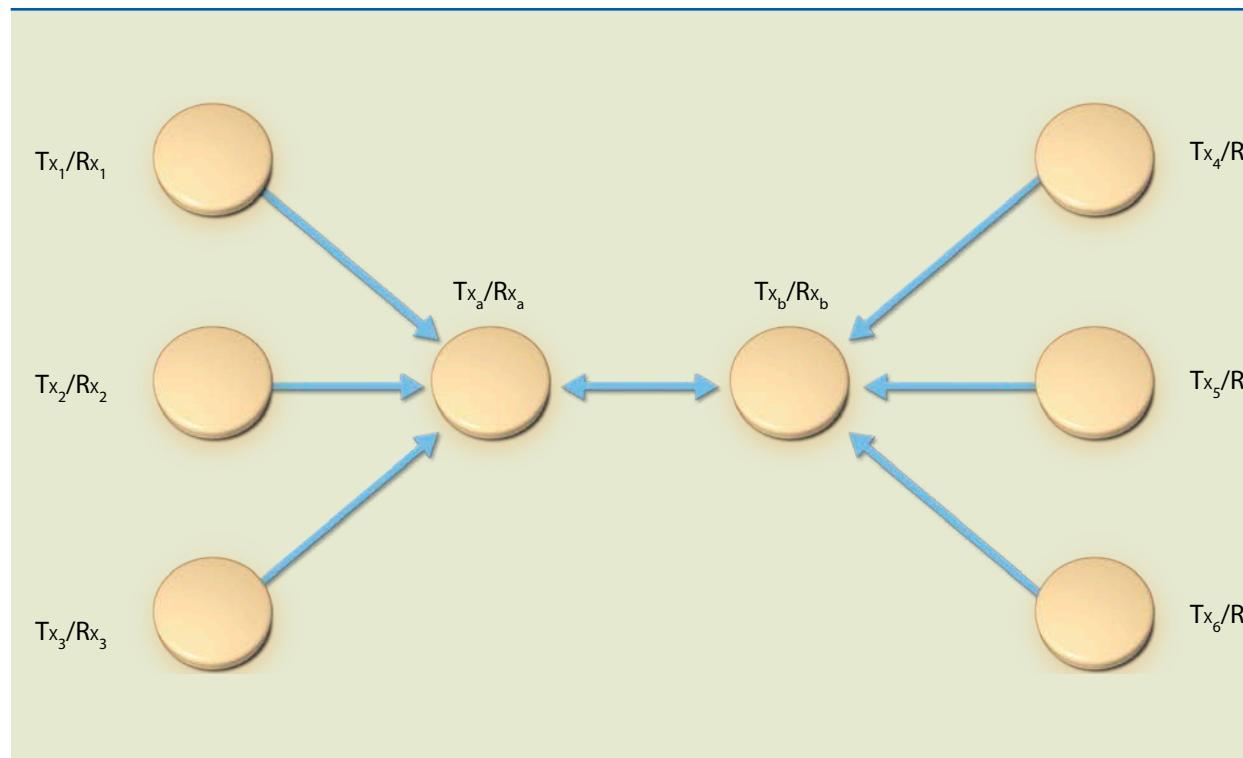


Figura 1.5

Enlace multiponto-multiponto.

Quanto ao sentido de transmissão:

- a) **Simplex** – A transmissão acontece em apenas um sentido. Ex.: radiodifusão comercial.
- b) **Half-duplex** – A transmissão acontece nos dois sentidos, mas de forma alternada. Ex.: radioamador.
- c) **Full-duplex** – A transmissão acontece nos dois sentidos, de forma simultânea. Ex.: telefonia fixa e móvel.

Quanto à mobilidade:

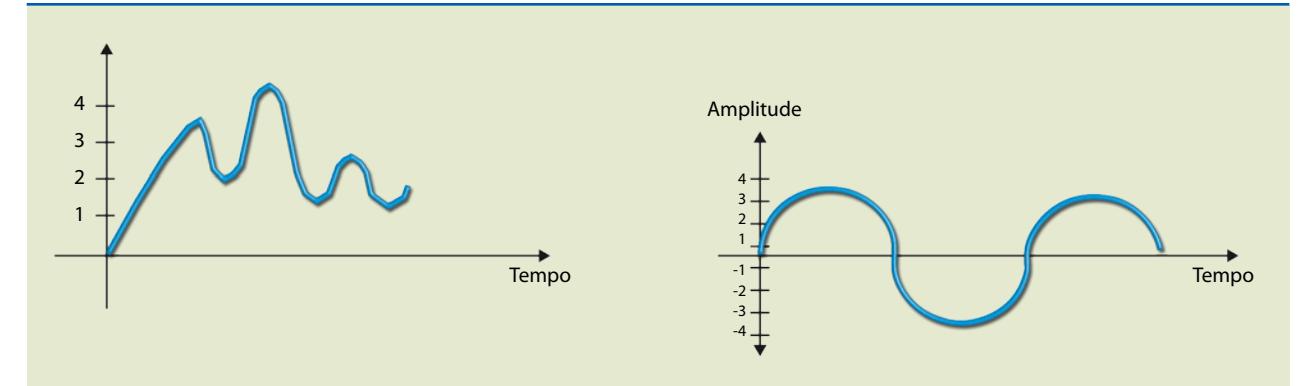
- a) **Enlace fixo** – Os elementos da rede estão em pontos definidos, sem mobilidade, geralmente interligados por uma rede de fios e cabos. Ex.: rede telefônica cabeada.
- b) **Enlace móvel** – Enlace estabelecido entre transmissores ou receptores móveis, por meio de radiofrequência, veiculares ou portáteis.
- c) **Radiobase** – Enlace estabelecido entre estações de rádio fixas no terreno.
- d) **Enlace misto** – Enlace que utiliza rádios e rede fixa de comunicação.

1.4 Sinais elétricos em telecomunicações

Para que as informações sejam transmitidas em um sistema de comunicação, é necessário transformá-las em sinais elétricos. Esses sinais são variações de tensões elétricas no decorrer do tempo e podem ser de dois tipos:

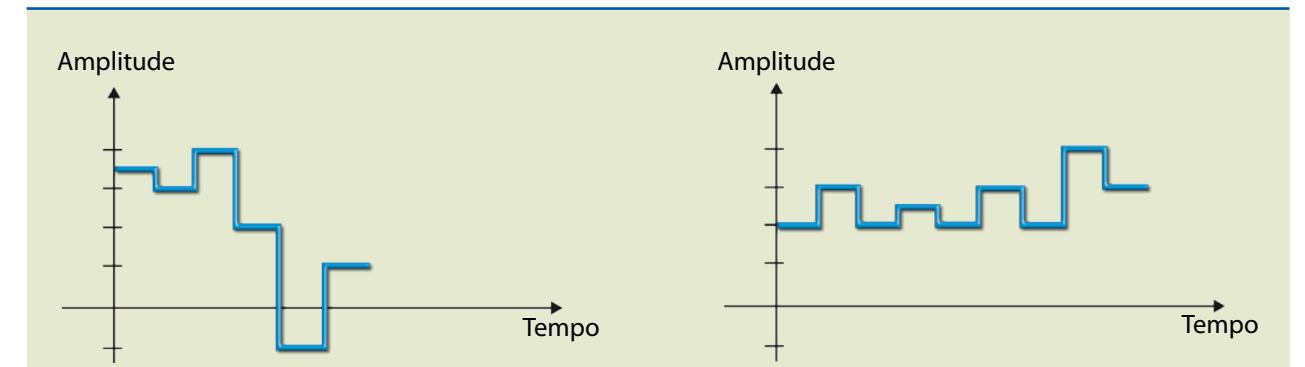
a) **Sinal analógico** – O sinal pode assumir infinitos valores de amplitude no decorrer do tempo (figura 1.6).

Figura 1.6
Sinal analógico.



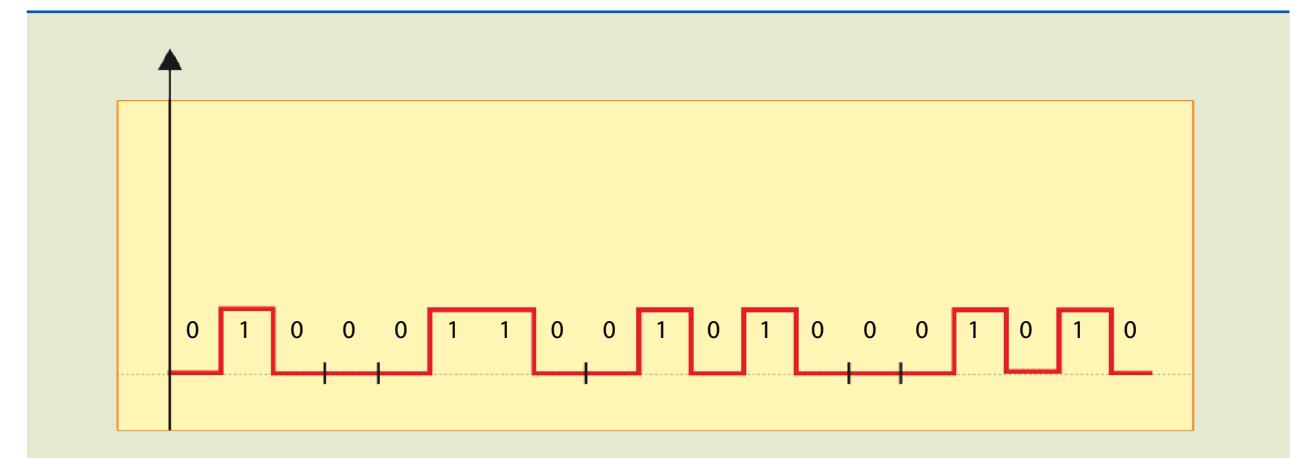
b) **Sinal digital** – O sinal pode assumir valores de amplitude predeterminados no decorrer do tempo (figura 1.7).

Figura 1.7
Sinal digital.



O sinal digital mais comum em transmissão de dados é o trem de pulsos. Trata-se de um conjunto de bits transmitido sequencialmente no tempo, em determinada velocidade, expresso em bits por segundo (figura 1.8).

Figura 1.8
Trem de pulsos.



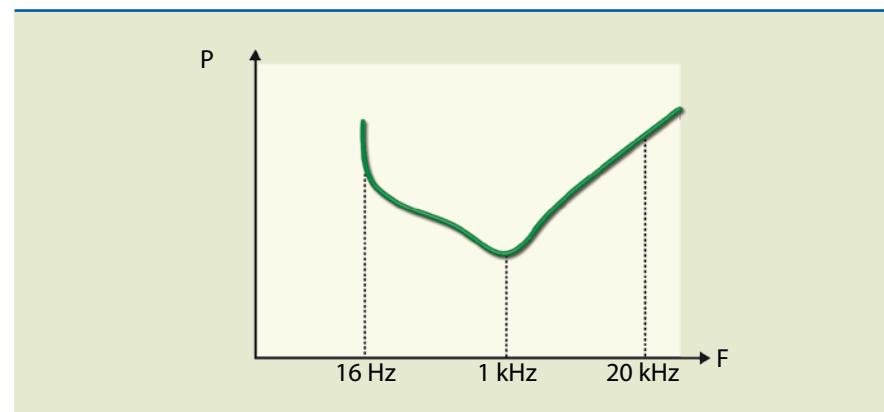
Um sinal elétrico pode ser denominado:

- Periódico** – Quando é repetitivo em intervalos de tempo iguais. O intervalo de repetição é chamado de período (T), dado em segundos. O período equivale ao tempo de realização de um ciclo. Já o número de ciclos realizados por segundo é denominado frequência, medida em hertz (Hz).
- Aperiódico** – Quando não é repetitivo.
- Finito** – Quando ocorre em um espaço de tempo finito.
- Aleatório** – Quando tem comportamento imprevisível. Ex.: o ruído elétrico.
- Pseudoaleatório** – Aparentemente aleatório, mas de certa maneira previsível. Ex.: criptografia.

1.5 Unidades de medida em telecomunicações

Quando o ouvido humano detecta um sinal emitido no ambiente, a intensidade desse sinal varia em função de sua frequência. Cada pessoa, no entanto, tem determinada percepção da intensidade sonora, de acordo com a faixa de frequência que é capaz de ouvir. Em média, a condição é a mostrada na figura 1.9.

Figura 1.9
Curva de resposta do ouvido humano.



Analizando a curva de resposta do ouvido humano, podemos observar que:

1. A banda máxima de frequências audíveis está compreendida entre 16 Hz e 20 kHz.
2. A maior parcela de potência audível está na faixa de 300 Hz a 3 400 Hz, sendo máxima na frequência de 1 kHz, em que a inteligibilidade cai apenas em torno de 8%.
3. A elevação da intensidade sonora percebida pela orelha humana obedece à escala logarítmica. Assim, quando a intensidade do som dobra, a potência foi elevada ao quadrado; para termos a percepção de aumento de três vezes a amplitude, a potência foi elevada ao cubo, e assim por diante. É por essa razão que adotamos as medidas sonoras em decibéis (dB).

Serão descritas, a partir de agora, algumas unidades de medida utilizadas em telecomunicações, para mensurar ganho ou atenuação.

1.5.1 Decibel (dB)

Em um dispositivo qualquer, aplica-se a potência de entrada P_1 e se obtém na saída a potência P_2 (figura 1.10).



Figura 1.10
Representação das potências de entrada e saída de um dispositivo.

Para determinar se houve atenuação ou ganho de potência, podemos utilizar as relações:

- Atenuação: $A = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2}$ (1.1)

- Ganho: $G = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1}$ (1.2)

Nesses casos, emprega-se a unidade de medida decibel (dB), que é um submúltiplo do bel; 1 dB corresponde à menor variação sonora perceptível pela orelha humana.

Conforme tais relações, percebemos que, se a potência de entrada (P_1) for maior que a potência de saída (P_2), ocorreu atenuação positiva, ou seja, ganho negativo; se P_2 for maior que P_1 , ocorreu ganho positivo. Para maior conveniência, trabalharemos apenas com relações de ganho.

O ganho total de um sistema será calculado da seguinte maneira:

$$G_T = G_1 + G_2 + \dots + G_n \quad (1.3)$$

em que:

- G_T é o ganho total do sistema.
- G_1, G_2, \dots, G_n são os ganhos dos diversos estágios independentes.

1.5.2 Néper (Np)

É a unidade de medida adotada por alguns países, em que a relação de ganho é dada pela expressão:

$$G(np) = 0.5 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (1.4)$$

Para realizarmos a conversão entre as escalas de ganho dB e Np, podemos considerar que:

$$G(\text{dB}) = 8,686 \cdot G(\text{Np})$$

$$G(\text{Np}) = 0,115 \cdot G(\text{dB}).$$

1.5.3 Nível de potência (dBm)

Comumente, em telecomunicações, torna-se necessária a representação das grandezas em unidades de potência na ordem de miliwatts – por exemplo, em níveis de transmissão de aparelhos celulares. Nesses casos, a potência de um sinal pode ser comparada a um sinal de referência de 1 mW e, para expressarmos as unidades logarítmicas, utilizamos o seguinte recurso:

$$LP(\text{dB}_m) = 10 \cdot \log \frac{P}{1\text{mW}} \quad (1.5)$$

A potência P deve ser expressa em mW ($1 \cdot 10^{-3}$ W), observando que os níveis absolutos em dBm nunca devem ser somados, subtraídos, multiplicados ou divididos. O valor de potência em dBm só pode ser somado a dB.

O **dB** é um número **relativo** e permite representar relações entre duas grandezas de mesmo tipo, como relações de potências, tensões, correntes ou qualquer outra relação adimensional. Portanto, permite definir ganhos e atenuações, relação sinal/ruído, dinâmica etc.

Por definição, uma quantidade **Q** em **dB** é igual a **10 vezes o logaritmo decimal** da relação de duas potências, ou seja:

$$Q(\text{dB}) = 10 \log (P_1/P_2).$$

Como a potência é proporcional ao quadrado da tensão dividida pela resistência do circuito, temos, aplicando as propriedades dos logaritmos (o log. do quadrado de n é duas vezes o log. de n):

$$Q(\text{dB}) = 20 \log (V_1/V_2) + 10 \log (R_2/R_1)$$

O **dBm** é uma unidade de medida de potência: $0 \text{ dBm} = 1 \text{ mW}$ (Não importa em qual resistência!)

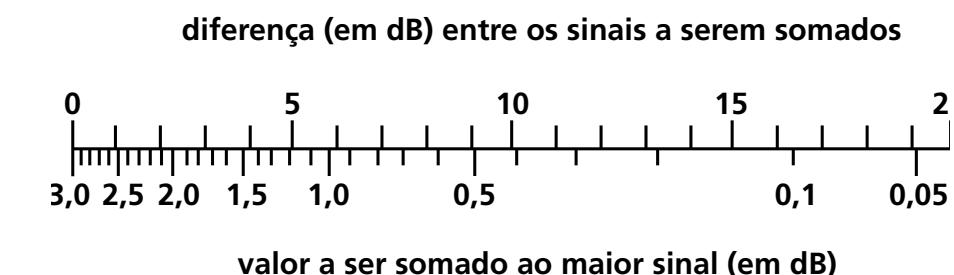
$$P(\text{dBm}) = 10 \log P(\text{mW})$$

Portanto : $3 \text{ dBm} = 2 \text{ mW}$, $30 \text{ dBm} = 1\text{W}$, $-30 \text{ dBm} = 1 \text{ microW}$

Para a soma de dBm com dBm ou dB com dBm levamos em consideração duas situações:

a) Soma de sinais não coerentes (ruído branco ou sinais de frequências diferentes): Por exemplo, qual é a potência total de um sinal com 10 dBm somado a um ruído de 6 dBm?

Solução: a diferença entre as parcelas é $10 \text{ dBm} - 6 \text{ dBm} = 4 \text{ dB}$ (Obs.: subtrair potências em unidades logarítmicas equivale a fazer um quociente em unidades lineares, portanto, o resultado é um numero adimensional, o dB). No gráfico da figura seguinte, obtemos para uma diferença de 4 dB o valor de 1,45 dB. A soma dos dois sinais tem uma potência de $10 \text{ dBm} + 1,45 \text{ dB} = 11,45 \text{ dBm}$.



Para soma de dBm com dBm ou dB com dBm levamos em consideração duas situações:

b) Sinais não coerentes se somam em potência: Sinais coerentes (mesma frequência) se somam (vetorialmente) em **tensão**. É preciso calcular esta soma vetorial de tensão e depois passá-la para potência. No caso de 2 sinais não coerentes, temos:

P_1 = potência maior, P_2 = potência menor,

diferença em dB : $dP(\text{dB}) = P_1(\text{dBm}) - P_2(\text{dBm}) = 10\log(P_1/P_2)$: escala superior do gráfico acima.

valor a ser somado (em dB) à maior potência (em dBm):

$$10\log[(P_1+P_2)/P_1] = 10\log[1+(P_2/P_1)]; \text{ como } P_2/P_1 = \text{antilog}(-dP/10),$$

temos: $10\log(1+\text{antilog}(-dP/10))$: escala inferior do gráfico acima.

Somar x dB a uma potência em dBm equivale a **multiplicar** esta potência em unidades lineares (W, por exemplo) por um número adimensional igual ao $\text{antilog}(x/10)$, portanto resulta em uma nova potência, e que pode ser expressa por exemplo em dBm. Portanto, a soma de dBm com dB resulta em dBm! Da mesma forma, **subtrair dB de uma potência em dBm** equivale a **dividir** esta potência por um numero adimensional, resultando em uma nova potência. Portanto, subtrair dB de dBm resulta em dBm!

Obs.: Somar diretamente os valores em dBm não faz sentido, pois equivale a multiplicar essas potências em unidades lineares. Por exemplo, as seguintes somas de sinais não coerentes:

$$0 \text{ dBm} + 0 \text{ dBm} = 3 \text{ dBm} \text{ (e não } 0 \text{ dBm!)}$$

$$0 \text{ dBm} + 3 \text{ dBm} = 4,76 \text{ dBm} \text{ (e não } 3 \text{ dBm!)}$$

$$-2 \text{ dBm} + 2 \text{ dBm} = 3,45 \text{ dBm} \text{ (e não } 0 \text{ dBm!)}$$

O sinal + se refere às unidades **lineares de potência**, ou seja, indica que estamos somando as potências em unidades lineares (W, mW, etc...) correspondentes aos valores em dBm.

Mas:

$$0 \text{ dBm} + 0 \text{ dB} = 0 \text{ dBm}$$

$$0 \text{ dBm} + 3 \text{ dB} = 3 \text{ dBm}$$

$$-2 \text{ dBm} + 2 \text{ dB} = 0 \text{ dBm}$$

Outras unidades de potência:

- dBW = potência de referência = 1 W;
- dBk = potência de referência = 1 kW;
- dBRAP (*reference acoustical power*) = potência de referência = 10^{-16} W.

1.5.4 Nível de tensão (dBu)

Vamos considerar um circuito elétrico em que aplicamos uma tensão elétrica de 775 mV rms (eficazes) sobre um resistor de 600Ω . Fazendo os cálculos de acordo com a Lei de Ohm, sobre esse resistor dissipará uma potência de 1 mW:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (1.6)$$

Substituindo os valores, temos:

$$P = \frac{(775 \text{ mV})^2}{600} = 1 \text{ mW}$$

Com base nesse raciocínio, podemos definir como nível de tensão:

$$LV(\text{dBu}) = 20 \cdot \log \frac{V}{775 \text{ mV}}$$

Essa expressão indica quantos decibéis determinada tensão está acima ou abaixo de 775 mV.

Algumas bibliografias definem dBu em função de uma tensão de 1 000 mV.

1.5.5 Relação entre dBm e dBu

Vimos que:

$$LP = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1} = 10 \cdot \log \frac{V_2^2/Z_2}{V_1^2/Z_1}$$

$$LP = 10 \cdot \log \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 + 10 \cdot \log \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)$$

Então, temos:

$$LP = 20 \cdot \log \left(\frac{V_2}{V_1} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)$$

Considerando $Z_1 = 600 \Omega$, então, $V_1 = 775 \text{ mV}$.

e assim:

nível de potência (dBm) = nível de tensão (dBu) + K

em que:

$$K(\text{dB}) = 10 \cdot \log \left(\frac{600}{Z} \right)$$

Para cada valor de impedância (Z) há um valor de K equivalente, conforme indica a tabela 1.1.

Impedância (Z), em Ω	K equivalente
600	0
300	3
150	6
75	9
60	10

Tabela 1.1

Impedância (Z) e K equivalente.



1.5.6 O dBV

É a unidade utilizada em transmissão, que indica a relação entre dois níveis de tensão pico a pico, sendo o de referência equivalente a 1 V_{pp} .

Assim:

$$\text{dBm} = 10 \cdot \log (P_2 / 1\text{ mW}) \text{ para qualquer } Z$$

$$\text{dBV} = 20 \cdot \log (V_{2\text{pp}} / 1\text{ V}_{\text{pp}}) = 20 \cdot \log V_{2\text{pp}}$$

$$V_{\text{ef}} = V_{2\text{pp}} / (2 \cdot \sqrt{2})$$

$$\text{dBm} = 10 \cdot \log [P_2 (\text{qualquer}) / 10\text{ mW}]$$

$$\text{dBm} = 10 \cdot \log P_2 = 10 \cdot \log [(V_{\text{ef}}^2 / 75) \cdot 1000\text{ mW}], \text{ somente para } Z = 75\Omega$$

$$\text{dBm} = 20 \cdot \log [V_{2\text{pp}} / (2 \cdot \sqrt{2})] - 10 \cdot \log 75 + 10 \cdot \log 1000$$

$$\text{dBm} = 20 \cdot \log V_{2\text{pp}} + 2 \cdot 2$$

$$\text{dBm} = \text{dBV} + 2 \cdot 2, \text{ para } Z = 75\Omega$$

1.5.7 Nível relativo (dBr)

Essa unidade indica a atenuação ou o ganho em pontos distintos do circuito em comparação com outro ponto do mesmo circuito, chamado de ponto de referência ou ponto de nível relativo zero (0 dBr). Em geral, esse ponto é virtual.

Como antigamente se utilizava em testes de circuitos o tom de 1 mW referente ao nível de voz humana, considera-se ainda 0 dBr um ponto de 0 dBm.

É importante notar que a unidade dBr não oferece nenhuma informação sobre o nível de potência absoluta no ponto. Para relacionarmos os diversos pontos de um sistema com a referência adotada, construímos diagramas de níveis, com os quais podemos visualizar todo o comportamento de um sistema referente a seus ganhos ou atenuações.

A figura 1.11 representa um diagrama de nível relativo de uma linha de transmissão, em que B é o ponto de referência de nível relativo zero, o qual indica obrigatoriamente um ponto físico no sistema.

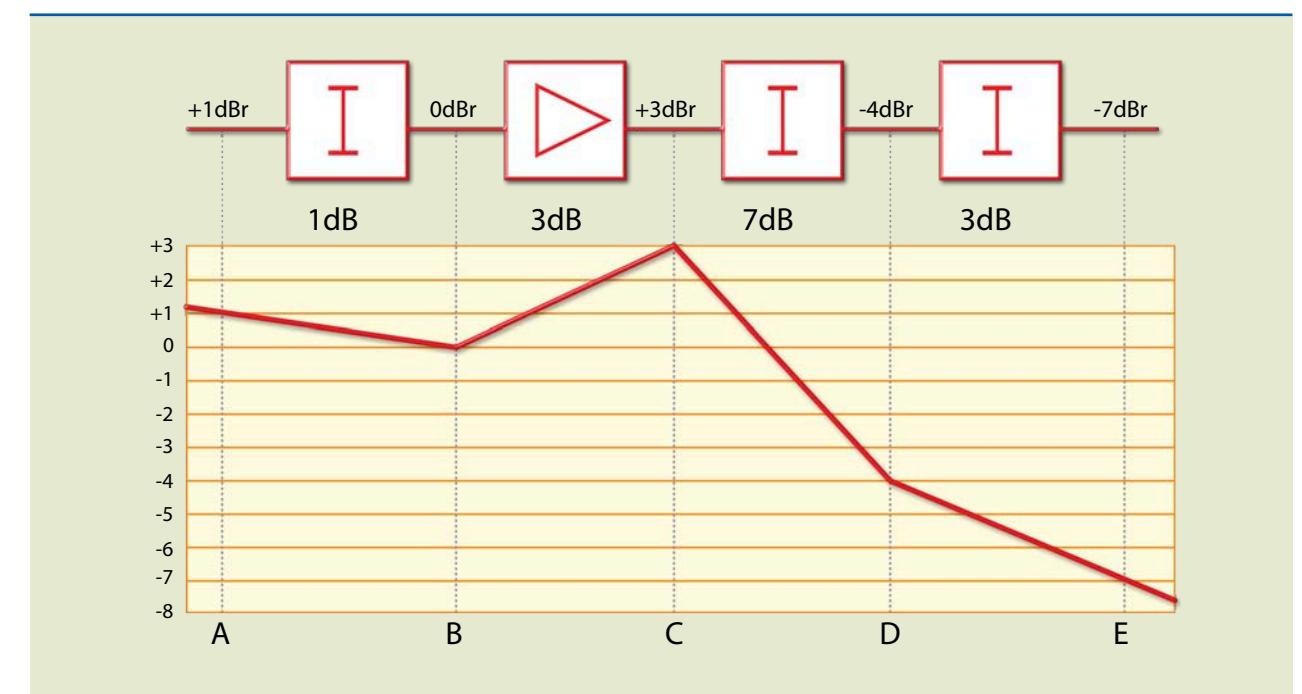


Figura 1.11

Diagrama de nível relativo de uma linha de transmissão.

1.5.8 O dBm0

Em sistemas de transmissão, além dos sinais de informação, são transmitidos sinais de sinalização, entre outros, cuja intensidade em relação aos níveis da informação também precisamos conhecer. Para isso, utilizamos a unidade dBm0, a qual indica o nível de potência absoluta de tais sinais no ponto de nível relativo zero.

Portanto: $X_{\text{dBm0}} = Y_{\text{dBm}} - Z_{\text{dBr}}$

Exemplo

Para um nível de sinalização de -5 dBm0 , a potência é de -5 dBm em um ponto de 0 dBr . Se em um ponto de -7 dBr um sinal tem um nível de -27 dBm , qual será seu nível em dBm0?

Solução:

$$-27\text{ dBm} - (-7\text{ dBr}) = -20\text{ dBm0}$$

Capítulo 2

Canais de comunicação

2.1 Definição

Canal é um meio físico entre os sistemas de transmissão e recepção, por onde trafegam os sinais elétricos ou eletromagnéticos da informação. O termo é utilizado para especificar um meio de comunicação:

- Canal fio.
- Canal rádio.
- Canal fibra óptica.

Também pode ser usado para especificar um segmento do espectro de frequências com largura de banda (*bandwidth*) ou uma faixa ocupada por uma transmissão de rádio. Ex.: a faixa de transmissão de radiodifusão FM, que vai de 88 MHz a 108 MHz, e um canal de rádio operando na faixa de 89,9 MHz.

2.2 Tipos de canais

2.2.1 Canal fio

É formado por pelo menos dois fios condutores elétricos, pelos quais trafegam os sinais da informação. O sistema de telefonia fixa utiliza esse tipo de canal; sua rede física é constituída por fios e cabos, interligando os assinantes à central telefônica (figura 2.1).

Figura 2.1

Canal fio:
(a) em par trançado e
(b) em cabo telefônico.



Outro sistema que usa canal fio é a TV a cabo por assinatura. No entanto, diferentemente da rede de telefonia, que emprega o par trançado de fios, o sinal de TV chega à casa do assinante por um cabo coaxial, com aspecto físico e caracte-

rísticas elétricas próprias. Além do serviço de TV, o cabo coaxial permite que as operadoras ofereçam conexão à internet com taxas de transmissão superiores às do par trançado e de melhor qualidade (figura 2.2).

Figura 2.2
Cabo coaxial.

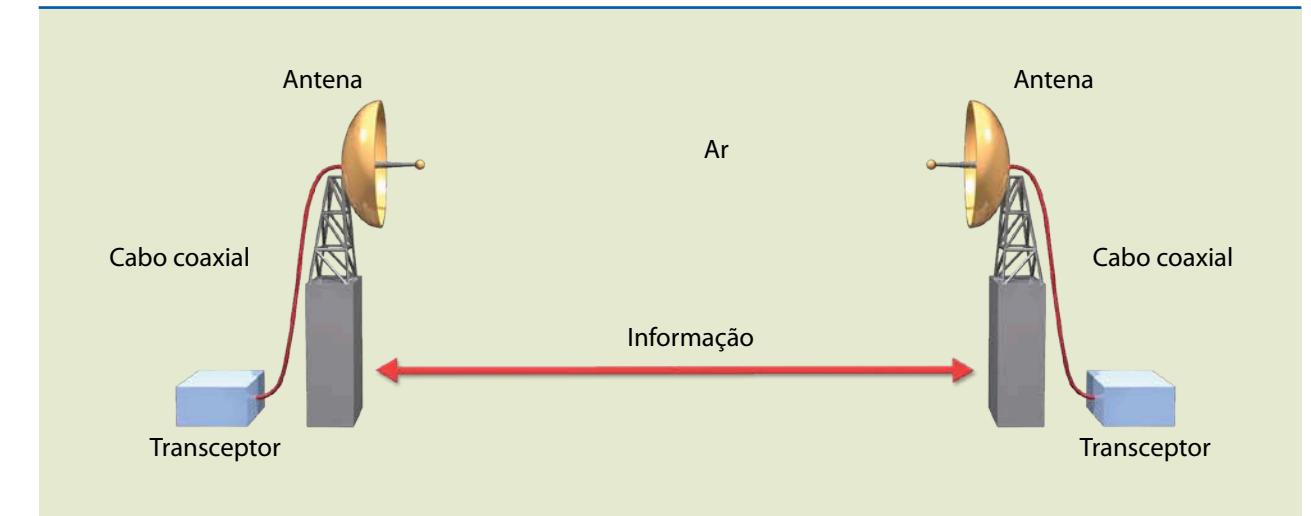


ZWOLA FASOLA / SHUTTERSTOCK

2.2.2 Canal rádio

É um segmento do espectro de frequências, com largura de banda BW, ocupado pela onda eletromagnética que transporta a informação. O espaço livre é o meio físico das comunicações via rádio (figura 2.3).

Figura 2.3
Representação esquemática do canal rádio.



O canal rádio é o sistema que apresenta o menor custo, porém as ondas eletromagnéticas, por se propagarem no espaço livre, encontram problemas de distúrbios e interferências, o que evidencia sua fragilidade.

Um enlace de radiocomunicação é formado por equipamentos chamados de transceptores, capazes de captar e retransmitir os sinais, interligando todo o sistema. Dentre os vários sistemas de rádio estão as transmissões de TV nas faixas de VHF e UHF, as rádios comerciais FM e AM e as comunicações via satélite.

2.2.3 Canal fibra óptica

A fibra óptica é um elemento monofilar de estrutura cristalina, condutor de luz, que transporta a informação na forma de energia luminosa. Apesar de possuir

alto índice de refração e a luz ao se propagar na fibra, o sinal sofre atenuação e dispersão (figura 2.4).

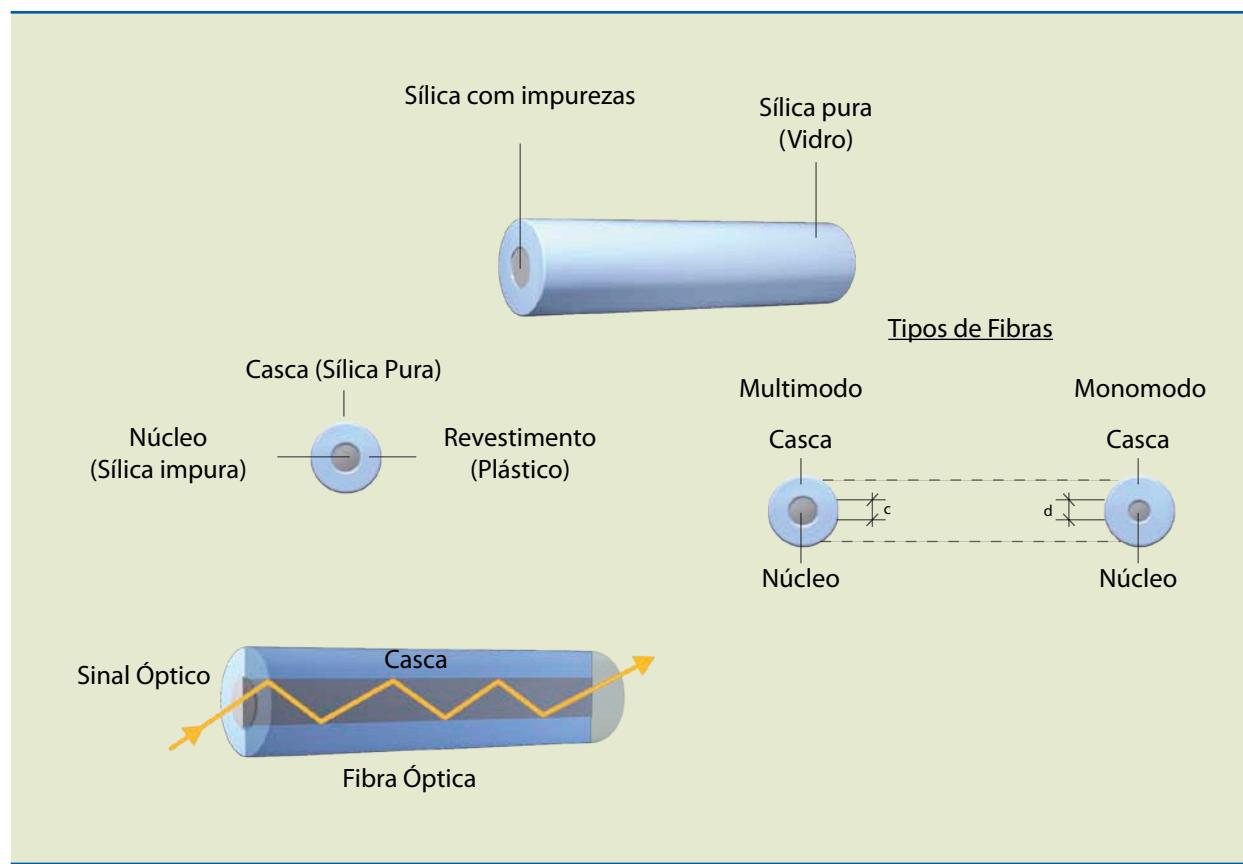


Figura 2.4

Detalhes técnicos da fibra óptica.

O canal óptico apresenta as seguintes vantagens:

- Maior capacidade de transmissão de dados, com largura de faixa aproximadamente 40 THz e taxas de transmissão da ordem de 40 Gb/s.
- Baixa atenuação.
- Isolação eletromagnética.

Sua principal desvantagem é o elevado custo de implantação e manutenção.

As redes ópticas são utilizadas em sistemas de alta taxa de transmissão de dados, como as redes digitais SDH de telefonia.

2.3 Propriedades dos canais de comunicação

2.3.1 Atenuação

Ao atravessar um meio de comunicação, o sinal elétrico vai perdendo energia e chega ao receptor com menor intensidade. Essa perda de energia ou potência, chamada de atenuação, pode ser causada por diversos fatores, dependendo do tipo de meio de comunicação utilizado (fibra, cabo ou espaço livre).

2.3.2 Limitação por largura de faixa

O espectro do sinal da informação deve ser menor ou no máximo igual à largura de faixa do canal. Vamos tomar como exemplo típico o canal telefônico (figura 2.5).

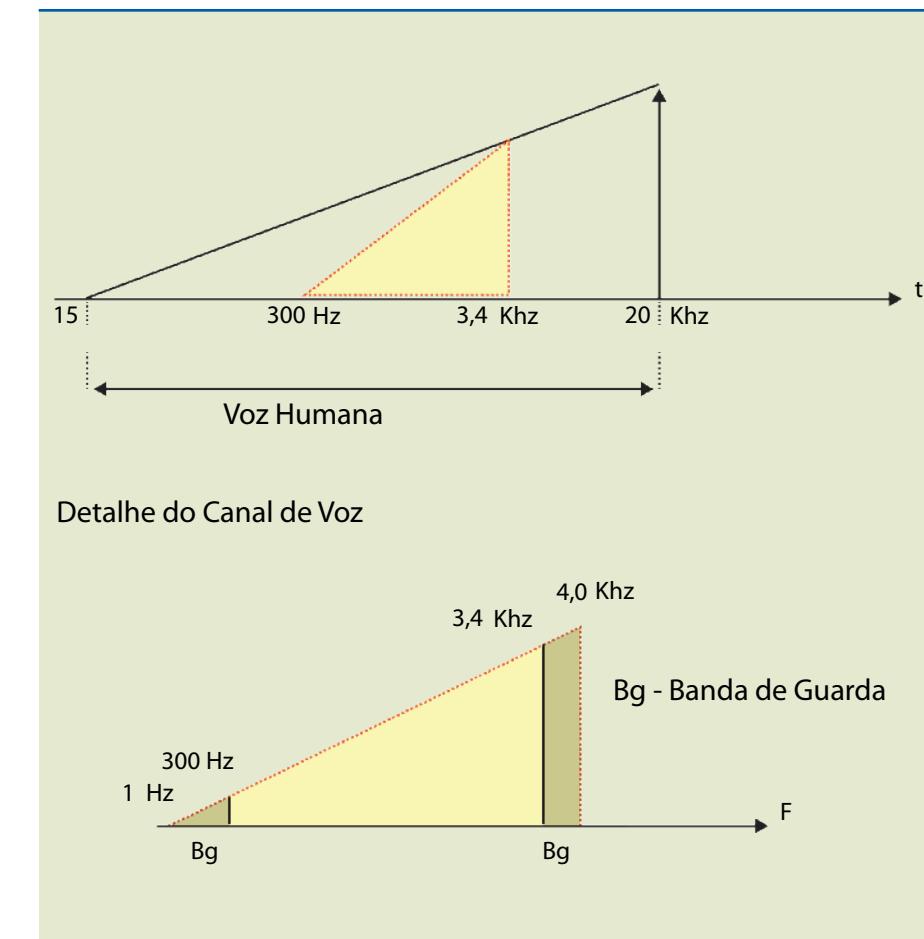


Figura 2.5

Espectro do sinal da informação.

Apesar de a voz humana estar compreendida entre 15 Hz e 20 kHz, é no intervalo entre 300 Hz e 3400 Hz que há maior concentração de energia da voz e maior inteligibilidade. Portanto, a largura de faixa do canal telefônico compreende apenas 4 kHz, com bandas de guarda laterais para evitar distorções na informação. Podemos, então, considerar a largura de faixa o “tamanho” do canal necessário para transmitir uma informação.

2.3.3 Retardo ou delay

É o tempo gasto pelo sinal para atravessar o canal de comunicação. Para calculá-lo, divide-se a distância percorrida entre os pontos de transmissão e recepção pela velocidade de propagação da onda. Em sistemas via satélite, em que a distância percorrida é relativamente grande (cerca de 40 000 km), o tempo de retardo tem valor significativo. Um efeito muito comum em ligações telefônicas via satélite é um eco durante a conversação, proveniente do tempo de retardo.

2.4 Distúrbios nos canais de comunicação

2.4.1 Ruído elétrico

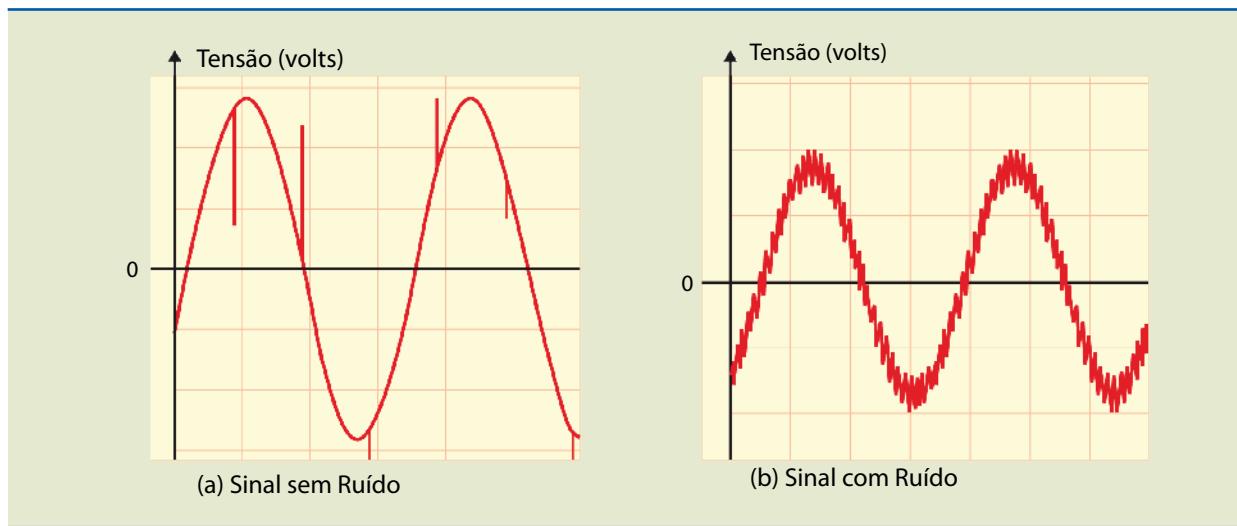
É o resultado da agitação térmica dos elétrons existentes na matéria. Pode ser percebido nas formas de corrente elétrica, quando gerado internamente em dispositivos eletrônicos, e de onda eletromagnética, no espaço livre.

O ruído elétrico tem comportamento aleatório e está presente em todo o espectro de frequências, prejudicando sobretudo as comunicações via rádio. Ele ataca e soma-se ao sinal da informação no canal de comunicação.

Figura 2.6

- (a) Sinal sem ruído e
- (b) sinal com ruído.

Na recepção de sinais de áudio, o ruído causa um efeito de chiado no alto-falante e, na recepção de sinais de TV, aparece na tela na forma de chuvisco (figura 2.6).



Basicamente, dois tipos de ruídos agridem o sinal da informação:

- Ruídos externos.
- Ruídos internos.

Figura 2.7

Representação esquemática do ruído externo.

As fontes de **ruído externo** são captadas pelas antenas de recepção e amplificadas (figura 2.7).



Alguns tipos de ruídos externos:

- **Ruído atmosférico ou estática** – Resulta de descargas elétricas na atmosfera provocadas pelos raios, sobrepondo-se ao sinal recebido. Um efeito muito comum que se ouve são cliques nos fones e nos alto-falantes. Em comunicações digitais, os ruídos atmosféricos causam perda da informação, que pode ser corrigida com a inserção de códigos de correção no sistema.
- **Ruído cósmico** – Originado de explosões solares, gera um forte campo magnético capaz de danificar os transceptores dos satélites de comunicação.
- **Ruído provocado pelo ser humano** – Produzido por máquinas e equipamentos, como motores elétricos de eletrodomésticos e motores a gasolina.

Relação sinal/ruído

É a relação entre a potência do sinal da informação e a potência do ruído na recepção, podendo ser determinado por:

$$\frac{S}{N} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \text{ em dB} \quad (2.1)$$

em que:

- S/N é a relação sinal/ruído (*signal/noise*, em inglês), em dB;
- P_s , a potência do sinal na recepção, em W;
- P_n , a potência do ruído na recepção, em W.

Valores mínimos de S/N para uma boa recepção

- Comunicações analógicas com voz: $S/N > 30$ dB.
- Comunicações analógicas com sinal de vídeo: $S/N > 45$ dB.
- Comunicações digitais: $S/N > 15$ dB.

O **ruído interno** é gerado pelas permanentes colisões de elétrons ao se estabelecer corrente elétrica nos dispositivos resistivos e semicondutores, presentes nos equipamentos de transmissão e recepção.

A potência de ruído interno produzido por um dispositivo é expressa pela **figura de ruído (F)**, expressa, em dB, como:

$$F = 10 \cdot \log n \quad (2.2)$$

em que n é a potência de ruído na saída do dispositivo/potência de saída sem ruído.

A potência de ruído sobre uma carga resistiva R casada com a saída do amplificador é definida por:

$$P_n = K \cdot T_o \cdot B \quad (2.3)$$



em que:

- P_n é a potência de ruído, em W;
- K, a constante de Boltzmann, igual a $1,38 \cdot 10^{-23}$ joule/kelvin;
- T_o , a temperatura ambiente, em kelvin;
- B, a banda do canal, em Hz.

Se houver estágios amplificadores no sistema, o ganho deverá ser considerado:

$$P_{n(\text{saída})} = G_{\text{sis}} \cdot F_{\text{sis}} \cdot K \cdot T_{o \text{ sis}} \cdot B \quad (2.4)$$

em que:

- G_{sis} é o ganho total = $G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot \dots \cdot G_n$;
- F_{sis} , a figura de ruído total = $F_1 + (F_2 - 1)/G_1 + (F_2 - 1)/G_2 + \dots$;
- $T_{o \text{ sis}}$, a temperatura efetiva do sistema = $T_1 + (T_2/G_1) + T_3/(G_1 \cdot G_2) + \dots$

2.4.2 Distorção do sinal

Consiste, praticamente, na alteração da forma de onda do sinal, provocada por diferentes atenuações impostas às diversas frequências que compõem o sinal da informação. Um exemplo é observado nas comunicações analógicas de voz por telefonia fixa, com alteração do timbre na reprodução da voz ao telefone.

2.4.3 Sinais interferentes ou espúrios

São sinais de outras comunicações que invadem o canal, como a linha cruzada na ligação telefônica ou as rádios piratas que interferem na comunicação das aeronaves com a torre de controle dos aeroportos.

Capítulo 3

Ondas de rádio



Ondas de rádio

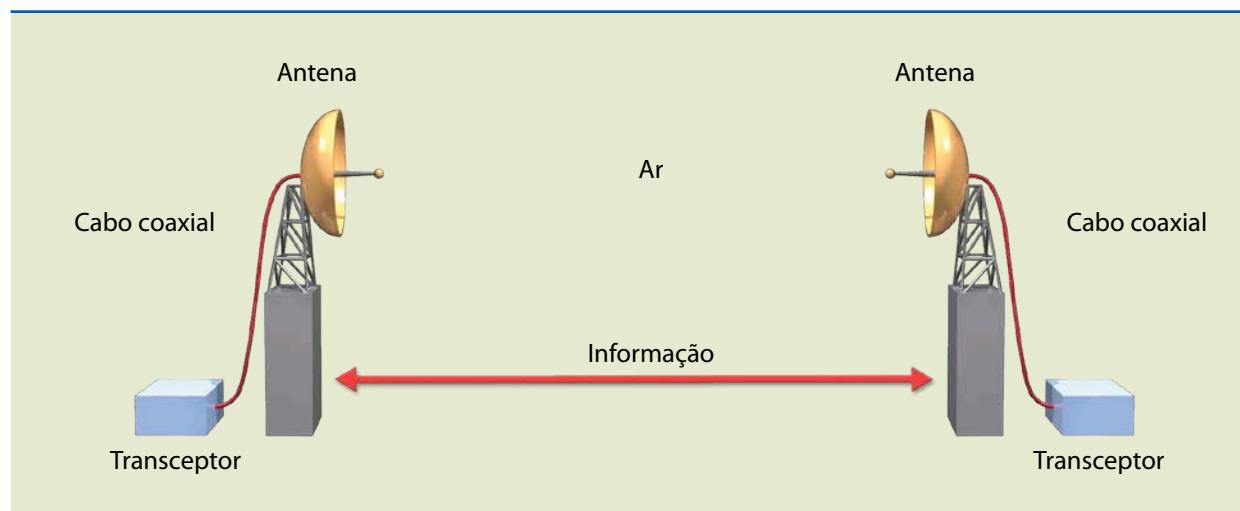
Definição e tipos de ondas de rádio.

3.1 Definição

Onda é a perturbação física de um meio, provocada por uma fonte. Por exemplo, quando jogamos uma pedra em um lago, no momento em que a pedra bate na superfície da água, uma perturbação é gerada, fazendo surgir um movimento circular em torno do ponto de colisão.

As ondas de rádio ou hertzianas são perturbações físicas causadas pela interação de dois campos: o elétrico (E) e o magnético (H), variáveis no tempo e perpendiculares entre si. Essas ondas são capazes de se propagar no espaço, irradiadas por uma antena. Podem ser geradas em qualquer frequência, mas, em telecomunicações, são utilizadas ondas de frequência superior a 100 kHz, passando por um processo denominado modulação, que será estudado com detalhes no capítulo 4.

Figura 3.1
Enlace de rádio ponto a ponto.



3.2 Natureza da onda de rádio

A onda eletromagnética é provocada pela interação de um campo elétrico (E) e de um campo magnético (H), de intensidades variáveis com o tempo e perpendiculares entre si e entre a direção de propagação da onda. É representada graficamente por duas senoides, uma para cada campo, indicando os parâmetros de amplitude, fase, frequência e comprimento de onda (figura 3.2).

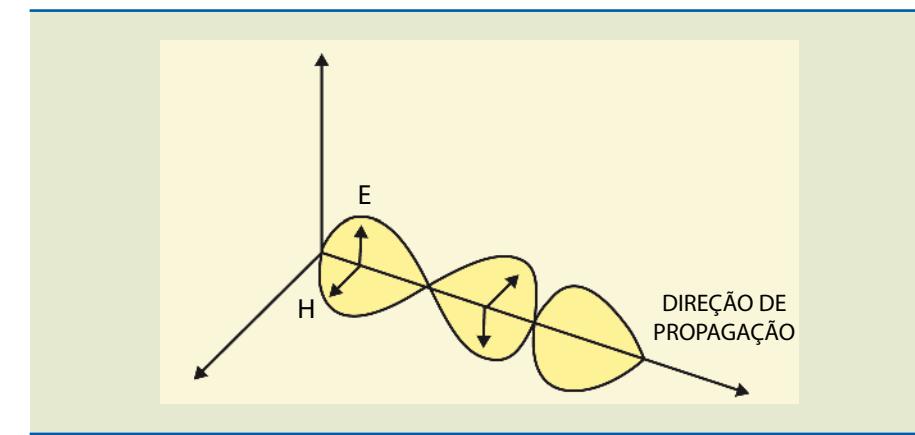


Figura 3.2
Representação gráfica da onda eletromagnética.

3.2.1 Comprimento de onda (λ)

É a distância percorrida pela onda durante a realização de um ciclo. Para uma onda senoidal, o comprimento de onda é a distância (em metros) entre os picos consecutivos (figura 3.3).

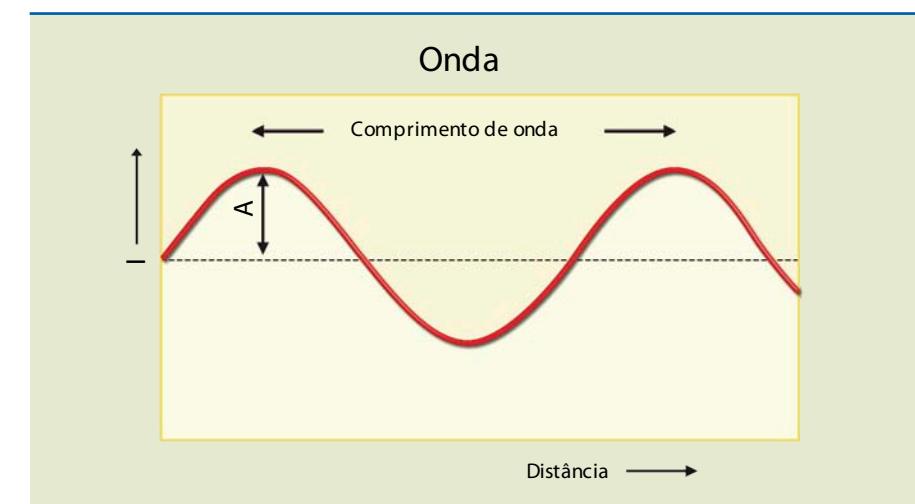


Figura 3.3
Representação do comprimento de onda.

3.2.2 Frequência (f)

É a velocidade de repetição de qualquer fenômeno periódico, ou seja, o número de ciclos realizados por segundo, em hertz.

3.2.3 Relação entre λ e f

O comprimento de onda é igual à velocidade da onda dividida pela frequência da onda. Quando se lida com radiação eletromagnética no vácuo, essa velocidade é igual à velocidade da luz para sinais se propagando no ar.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$



em que:

- λ é o comprimento de onda, em metros;
- c , a velocidade da luz no vácuo, igual a $3 \cdot 10^8$ m/s;
- f , a frequência, em hertz.

Os campos E e H são grandezas vetoriais, com intensidade, direção e sentido. Suas unidades de medida são:

- Campo elétrico $E = V/m$.
- Campo magnético $H = A/m$.

O instrumento utilizado para medir a intensidade de campo elétrico do ponto de emissão chama-se **medidor de intensidade de campo**.

A potência de emissão, em watts, é calculada pelo produto do quadrado da corrente de radiofrequência que alimenta a antena transmissora pela resistência desta:

$$P = I_{RF}^2 \cdot R_{ant} \quad (3.2)$$

A impedância intrínseca do espaço livre é obtida pela relação E/H , determinada por:

$$Z_0 = E/H = 120\pi = 377 \Omega \quad (3.3)$$

O modo como a onda se propaga no espaço vai depender principalmente da faixa em que se enquadra a frequência de transmissão.

3.2.4 Polarização

É a maneira como os campos se orientam no espaço, tomada em função da posição do campo elétrico (E) em relação ao solo.

a) Antena com polarização vertical (figura 3.4).

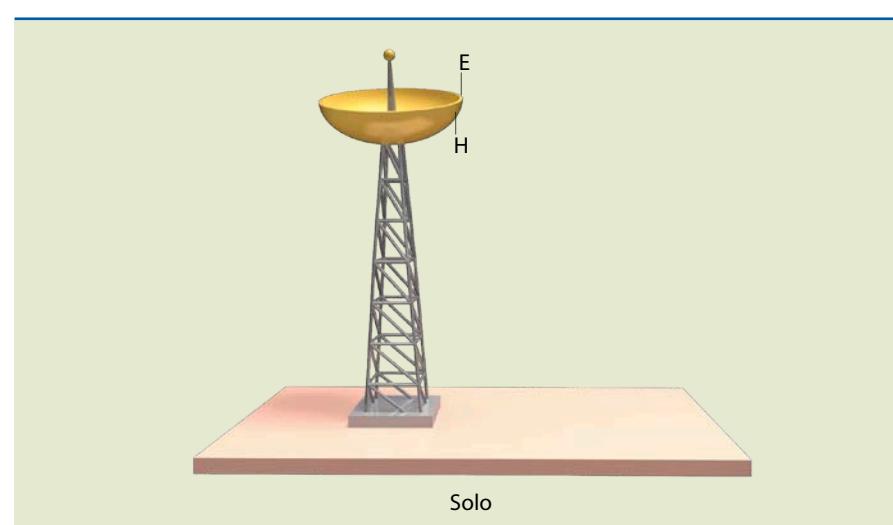


Figura 3.4

Antena com polarização vertical.

b) Antena com polarização horizontal (figura 3.5).

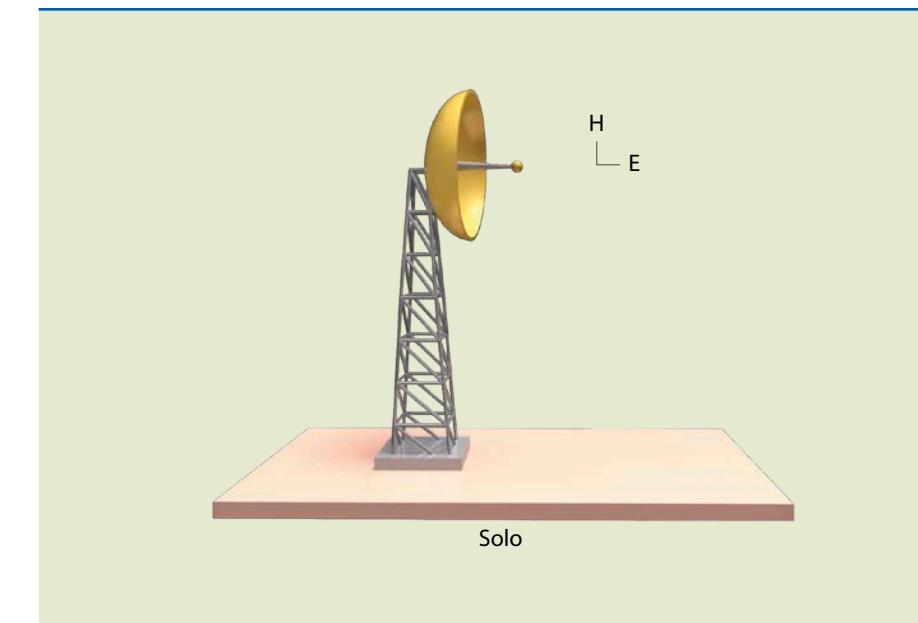


Figura 3.5

Antena com polarização horizontal.

As polarizações horizontal e vertical são chamadas de polarizações lineares.

Existem ainda polarizações:

- Circular.
- Elíptica.
- Ortogonal.
- Cruzada.

3.3 Distúrbios específicos de radiocomunicações

3.3.1 Ondas de multipercorso

São ondas secundárias provenientes de distintos percursos (reflexões no solo ou em obstáculos), que resultam da dispersão de energia eletromagnética irradiada na transmissão e que chegam à recepção com diferentes intensidades e defasagens em relação à onda principal ou direta.

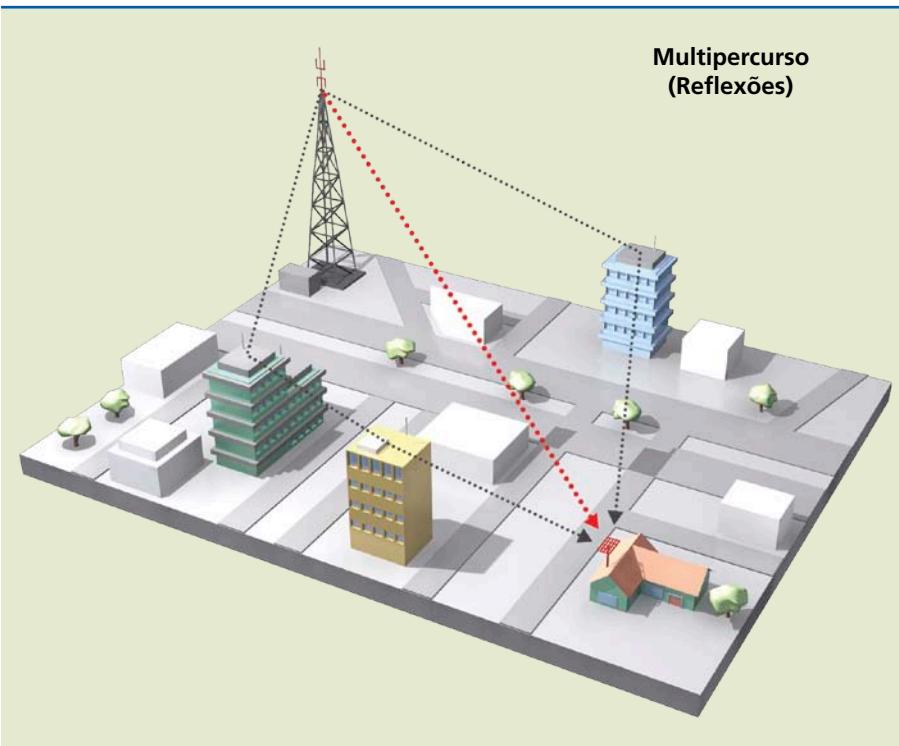
O sinal resultante na recepção é a soma vetorial dos sinais secundários com o sinal principal. Um exemplo prático é o efeito “fantasma” que aparece nas transmissões de TV (figura 3.6).

3.3.2 Desvanecimento

São flutuações do sinal recebido, decorrentes de problemas na transmissão, como as ondas de multipercorso. A intensidade do sinal recebido varia a cada instante, prejudicando a recepção – por exemplo, na recepção de radiodifusão AM durante a noite.

Figura 3.6

Ilustração esquemática do efeito "fantasma".



3.3.3 Ação da chuva

A chuva causa degradação na recepção, enfraquece e despolariza a onda de rádio, apresentando-se como obstáculo.

3.3.4 Efeito Doppler

O **efeito Doppler**, descrito pela primeira vez em 1842 pelo físico Christian Johann Andreas Doppler (1803-1853), é a alteração da frequência de uma onda sonora ou luminosa percebida por um observador em razão de um movimento de aproximação ou afastamento de uma fonte geradora de onda em relação a ele.

No caso de aproximação, a frequência aparente da onda recebida pelo observador fica maior que a frequência original e, no caso de afastamento, a frequência aparente diminui. Um exemplo do efeito Doppler é a sirene de uma ambulância em uma rua passando por um observador. Ao se aproximar, o som é mais agudo e, ao se afastar, mais grave. Nas comunicações sem fio, como a telefonia celular, esse fenômeno pode causar a perda da comunicação, pois o sinal chega ao receptor em uma frequência diferente, caso o efeito seja acentuado.

3.3.5 Dutos

São formados por inversões térmicas que ocorrem nas camadas de ar sobre a superfície terrestre, afetando sobretudo os enlaces de rádio em visibilidade ou ponto a ponto. Provocam o desvio da onda de sua direção principal.

Capítulo 4

Modulação do sinal da informação

Quando transmitimos um sinal de informação por um meio físico, como o ar, utilizamos uma antena, cujo comprimento está associado ao comprimento de onda. Para transmitirmos um sinal de frequência 20 kHz, deveríamos ter uma antena de aproximadamente 3,5 km de comprimento, procedimento que é inviável. Partindo desse princípio, a solução encontrada foi associar o sinal que se deseja transmitir a um sinal de frequência alta (portadora). Dessa maneira, o comprimento final da antena terá dimensões possíveis de serem implementadas.

Modular um sinal é fazer a translação de frequência do sinal de informação para uma frequência de portadora. Para isso, alteramos uma das características do sinal da portadora, que pode ser a amplitude, a frequência ou a fase. Para modulações analógicas, utilizamos como portadora um sinal senoidal.

4.1 Modulação em amplitude (AM – *amplitude modulation*)

Nesse tipo de modulação, o sinal a ser transmitido (sinal modulante) será somado ao sinal de frequência alta (portadora), modificando sua amplitude.

Dentre os tipos de modulação em amplitude encontram-se as tecnologias:

- AM-DSB.
- AM-DSB/SC.
- AM-SSB.
- AM-VSB.

4.1.1 AM-DSB (*amplitude modulation – double side band*)

Nesta seção, serão apresentados os conceitos gerais da modulação AM-DSB (sigla em inglês de amplitude modulada com duas bandas laterais). As figuras 4.1 e 4.2 apresentam, respectivamente, o diagrama de blocos de um modulador desse tipo e as formas de onda.

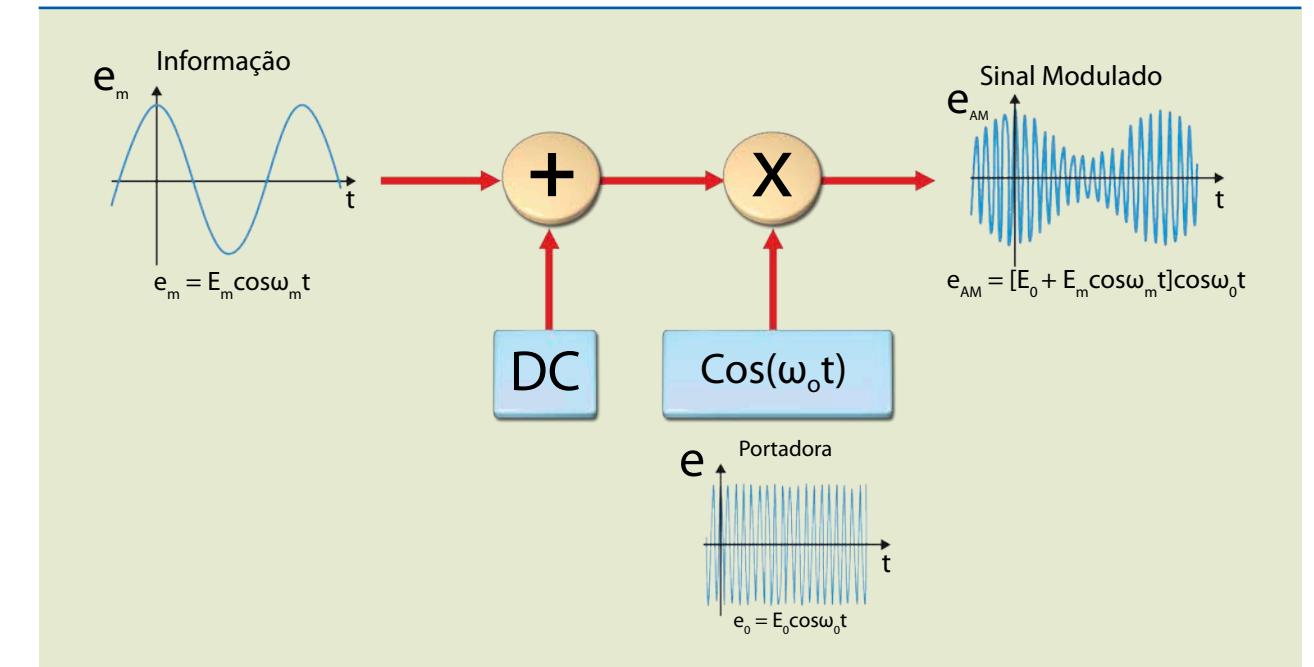


Figura 4.1
Diagrama de blocos de um modulador AM-DSB.

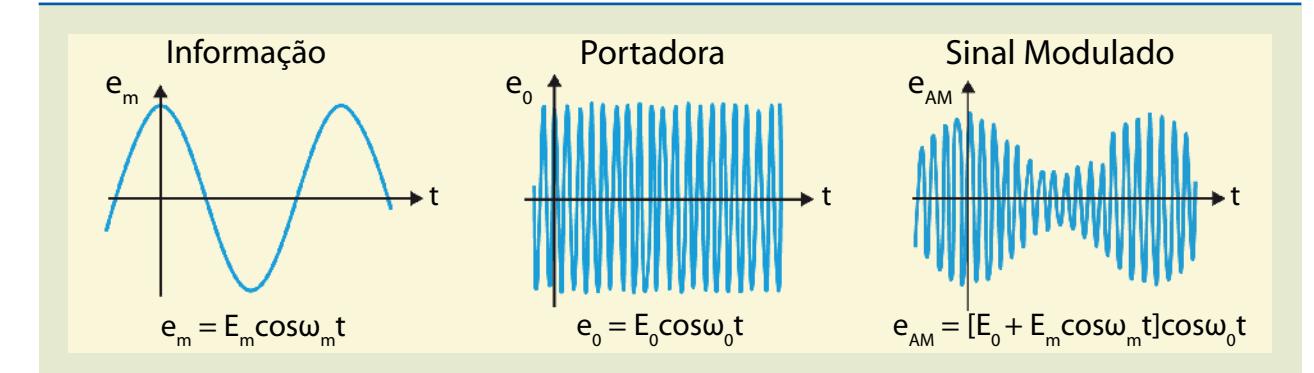


Figura 4.2
Formas de ondas do AM-DSB.

O espectro do sinal modulado AM-DSB (figura 4.3) pode ser obtido pela equação:

$$e_{AM} = [E_0 + E_m \cos \omega_m t] \cos \omega_0 t \quad (4.1)$$

Lembrando que

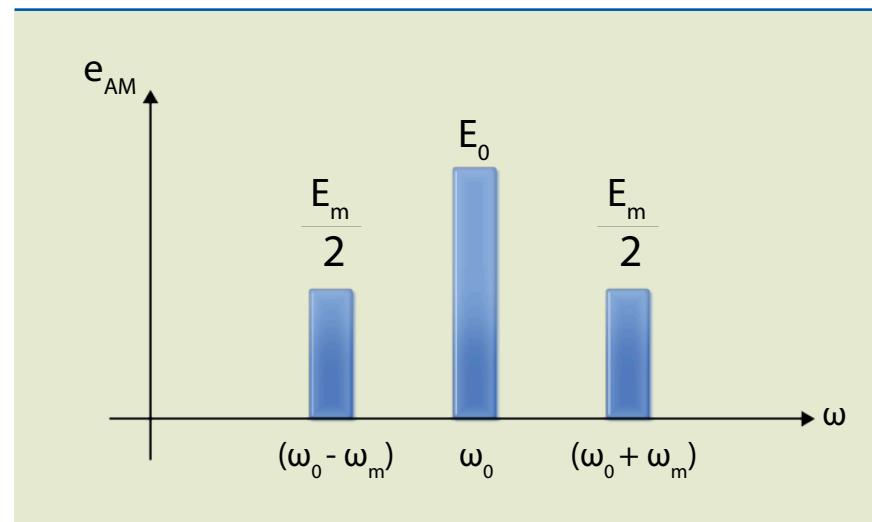
$$\cos A \cdot \cos B = \frac{1}{2} [\cos(A+B) + \cos(A-B)], \text{ então:}$$

$$e_{AM} = E_0 \cos \omega_0 t + \frac{E_m \cos(\omega_0 + \omega_m)t}{2} + \frac{E_m \cos(\omega_0 - \omega_m)t}{2}$$



Figura 4.3

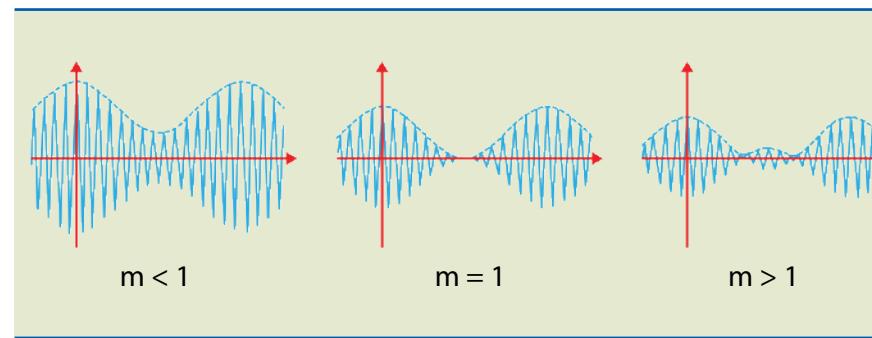
Espectro de amplitudes do AM-DSB.



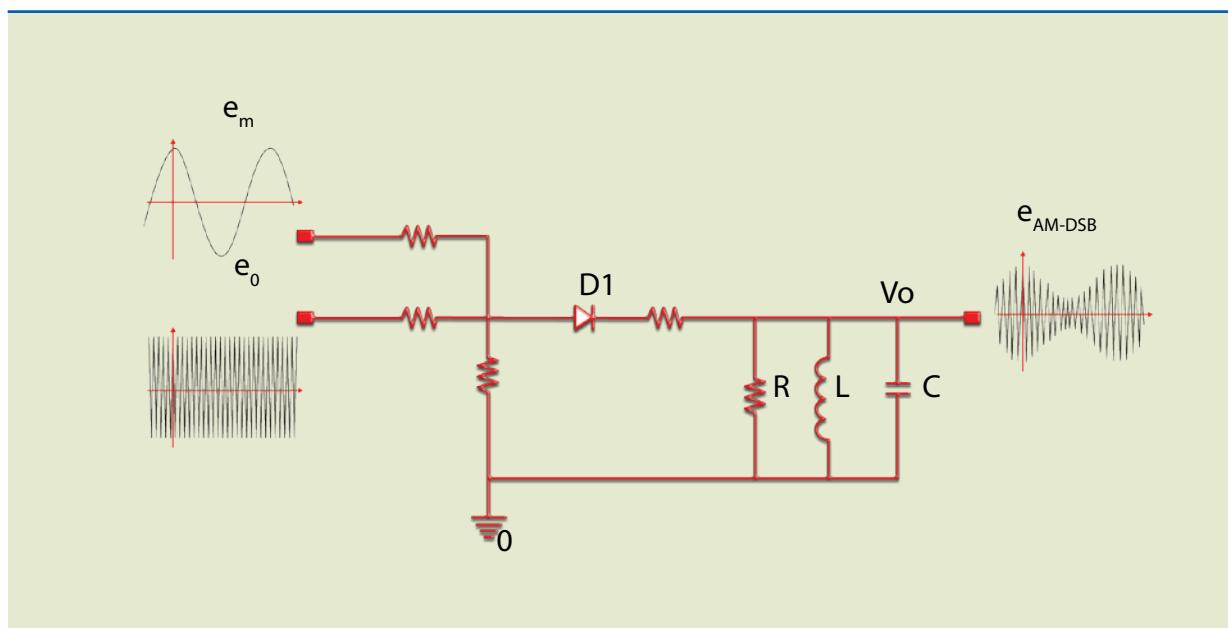
O índice de modulação (**m**) é o valor obtido pela razão $m = E_m/E_0$ (figura 4.4). Esse valor não deve ser superior a 1 para que não haja distorção na recuperação do sinal modulado (informação).

Figura 4.4

Representação dos índices de modulação.

**Figura 4.5**

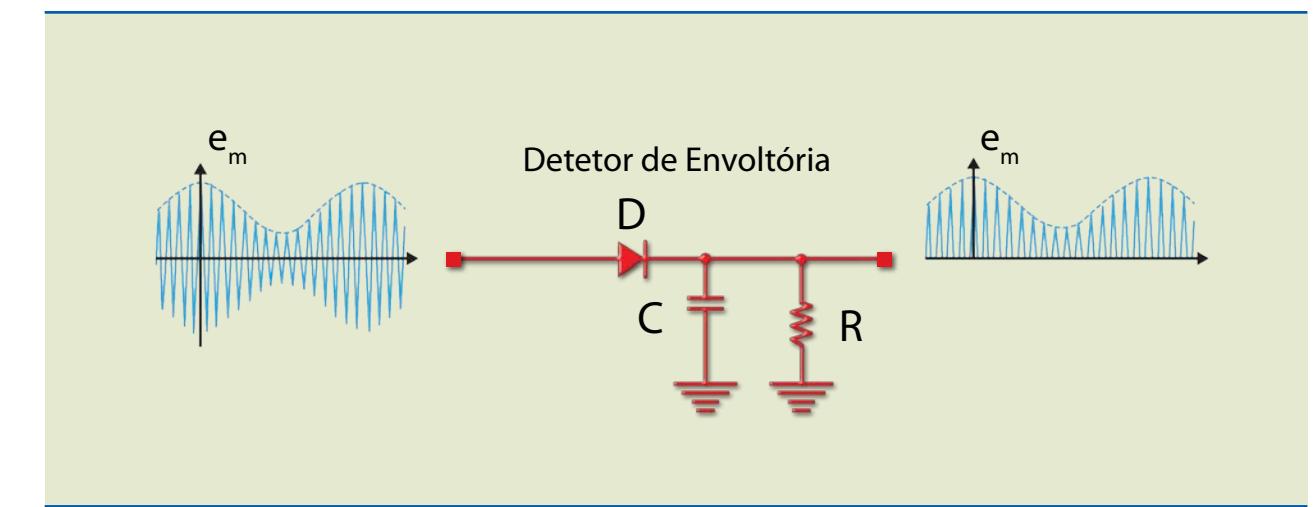
Círcuito modulador AM-DSB.



Em um **círculo modulador AM-DSB** (figura 4.5), o sinal modulante (informação) é somado ao sinal da portadora (frequência alta capaz de ser transmitida no ar) e ligado ao circuito tanque (LC), o qual gera uma segunda banda de sinal modulante a ser transmitido. Esse sinal, então, é adequado e transmitido via antena, por meio de um casamento de impedâncias.

Figura 4.6

Círculo demodulador AM-DSB.



Em um círculo **demodulador AM-DSB**, o sinal transmitido é captado pela antena do circuito receptor e recuperado por meio do circuito detector de envoltória, eliminando uma das bandas que foram transmitidas, e sobre a envoltória do sinal de portadora encontra-se o sinal de informação.

Para calcularmos a **potência do sinal AM-DSB**, devemos considerar como impedância da antena o valor normalizado $R = 1 \Omega$, igual ao valor da impedância de saída do circuito, para que ocorra a máxima transferência de potência.

Levando em conta que a potência é dada pela expressão $P = V^2/R$ e o sinal é transmitido na envoltória da onda portadora, sendo esse sinal composto por duas bandas laterais, três potências estarão envolvidas: potência da portadora, potência da banda lateral inferior (BLI) e potência da banda lateral superior (BLS).

$$P_p = \frac{E_0^2}{2R}$$

Portanto,

$$P_p = \frac{E_0^2}{2} \quad (4.2)$$

em que:

- P_p é a potência da portadora;
- E_0 é a tensão da portadora.

$$P_{BLS} = \frac{\left(\frac{E_m}{2}\right)^2}{2R} = \frac{E_m^2}{8} \quad (4.3)$$

em que:

- P_{BLS} é a potência da banda lateral superior;
- E_m , a tensão da informação.

$$P_{BLI} = \frac{\left(\frac{E_m}{2}\right)^2}{2R} = \frac{E_m^2}{8} \quad (4.4)$$

em que:

- P_{BLI} é a potência da banda lateral inferior;
- E_m , a tensão da informação.

A potência total de transmissão AM será dada, então, pela soma das potências da portadora, da banda lateral superior e da banda lateral inferior.

$$\text{Potência}_{\text{Total}} = P_t = P_p + P_{BLS} + P_{BLI}$$

$$P_t = \frac{E_0^2}{2} + \frac{E_m^2}{8} + \frac{E_m^2}{8} = \frac{E_0^2}{2} + \frac{E_m^2}{4}$$

A figura 4.7 mostra o espectro de potências do AM-DSB.

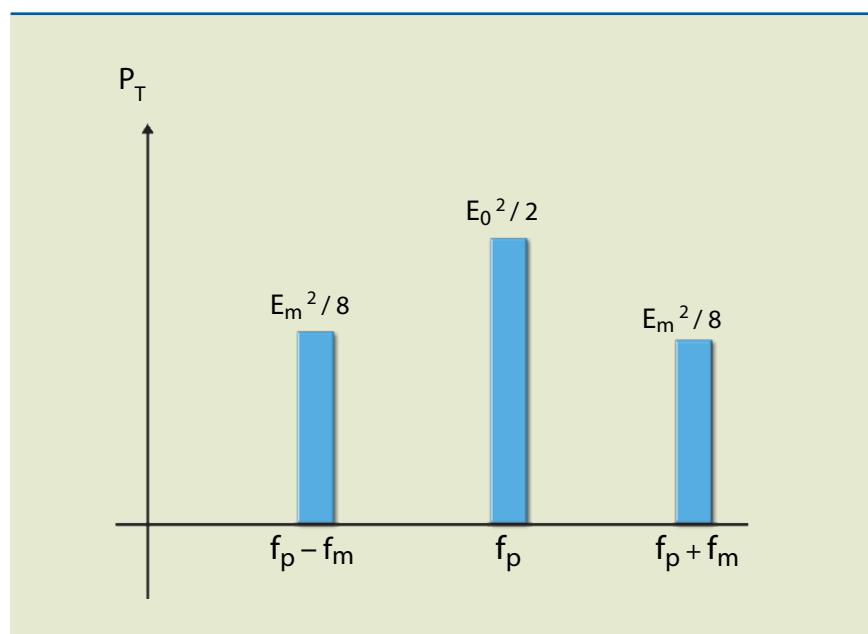


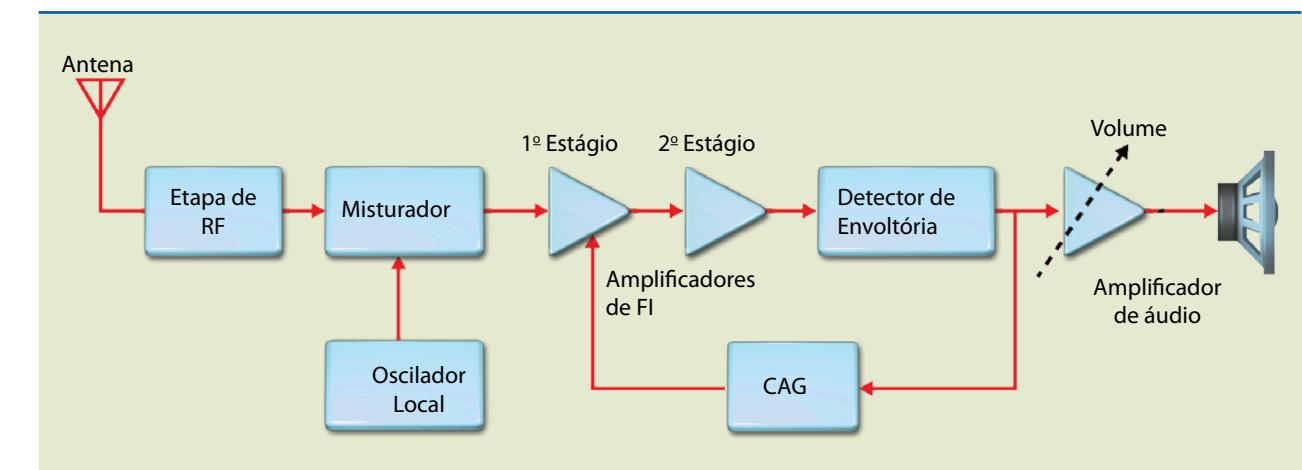
Figura 4.7

Espectro de potências do AM-DSB.

Receptor super-heteródino

Trata-se de um sistema que possibilita misturar diferentes frequências, com base em uma referência que está acima do sinal de entrada, valor chamado de intermediário. Esse sistema possui um oscilador local sintonizado com frequência de 455 kHz acima da frequência da portadora. Utiliza-se 455 kHz por causa da faixa recebida (535 a 1 605 kHz), para reduzir a interferência por imagem e a interferência por apito.

A figura 4.8 mostra o diagrama de blocos de um receptor super-heteródino.



As funções dos blocos são as seguintes:

- **Antena** – Para a faixa de AM comercial, é comum utilizar antena com a etapa de RF, usando uma bobina de ferrite; também pode ser empregada antena telescópica de $\lambda/2$ a $\lambda/4$.
- **Etapa de RF** – Circuito tanque (LC), responsável pela sintonia.
- **Misturador** – Circuito multiplicador, que normalmente aproveita a não linearidade de um transistor.
- **Oscilador local** – Oscilador senoidal ajustável por um capacitor variável.
- **Amplificadores de FI** – Amplificadores com transistor sintonizados em 455 kHz (frequência intermediária), com o uso de transformadores de FI, a fim de aumentar a seletividade do sinal, dar-lhe ganho e possibilitar o emprego do CAG.
- **Detector de envoltória** – Detector de envoltória com polaridade adequada (geralmente negativa) ao CAG.
- **CAG (controle automático de ganho)** – Filtro passa-baixa que recupera o valor médio do sinal demodulado e o aplica na entrada do amplificador de FI. Sua principal função é manter o volume constante, independentemente da intensidade dos sinais das diversas estações e do movimento do receptor.
- **Amplificador de áudio** – Sua função é proporcionar uma amplitude de sinal adequada, possibilitando que a orelha humana escute a informação proveniente da emissora selecionada.

Figura 4.8

Diagrama de blocos de um receptor super-heteródino.

O comprimento de onda de um sinal é dado por $\lambda = c / f_0$, em que c é a velocidade da luz no vácuo e f_0 , a frequência da portadora.

É importante observar que o circuito misturador multiplica a frequência da portadora da emissora sintonizada pela frequência do oscilador local, gerando, assim, uma frequência soma ($f_{OL} + f_0$) e uma frequência diferença ($f_{OL} - f_0$). Ou a soma ou a diferença de frequências resultará em 455 kHz, que é a frequência de sintonia do receptor AM. Esse processo é conhecido como **batimento de frequências**.

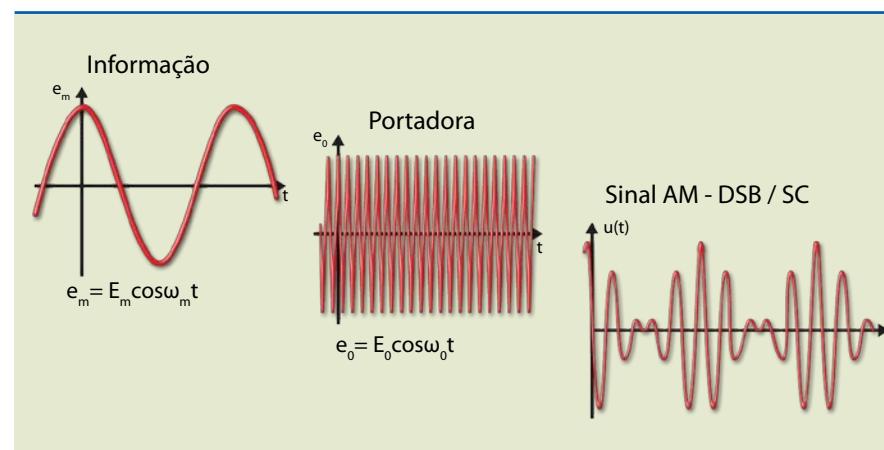
4.1.2 AM-DSB/SC (amplitude modulation – double side band suppressed carrier)

Como vimos, o AM-DSB transmite um sinal modulado em amplitude e, na etapa de transmissão, o circuito modulador envia para o espaço livre uma onda portadora mais duas bandas laterais, as quais contêm a informação.

De acordo com o espectro do sinal AM-DSB, a energia interessante se encontra nas bandas laterais (informação) e a energia transmitida pela portadora não contém informação alguma, que não precisaria ser transmitida. É por esse motivo que foi implementado o sistema AM-DSB/SC, que é a modulação em amplitude com duas bandas laterais e portadora suprimida, conforme mostra a figura 4.9.

Figura 4.9

Modulação em amplitude com duas bandas laterais e portadora suprimida.



O princípio de funcionamento do AM-DSB/SC consiste na multiplicação de sinais cossenoidais.

Dados os sinais de informação e portadora, respectivamente:

$$e_m = E_m \cdot \cos \omega_m t \quad (4.5)$$

$$e_0 = E_0 \cdot \cos \omega_0 t$$

$$\text{Multiplicando } e_0 \cdot e_m = \underbrace{E_0 \cdot \cos \omega_0 t}_{\text{A}} \cdot \underbrace{E_m \cdot \cos \omega_m t}_{\text{B}}$$

$$= \underbrace{E_0 \cdot E_m}_{\text{C}} \cdot \underbrace{\cos \omega_0 t \cdot \cos \omega_m t}_{\text{D}}$$

Aplicando a relação

$$\cos A \cdot \cos B = \frac{1}{2} [\cos(A+B) + \cos(A-B)], \text{ obtemos:}$$

$$e_0 \cdot e_m = \frac{E_0 E_m}{2} \cdot \cos(\omega_0 + \omega_m)t + \frac{E_0 E_m}{2} \cdot \cos(\omega_0 - \omega_m)t$$

$$\text{Portanto: } e_{AM-DSB/SC} = \frac{E_0 E_m}{2} \cdot \cos(\omega_0 + \omega_m)t + \frac{E_0 E_m}{2} \cdot \cos(\omega_0 - \omega_m)t$$

O espectro de amplitudes do AM-DSB/SC pode ser visto na figura 4.10.

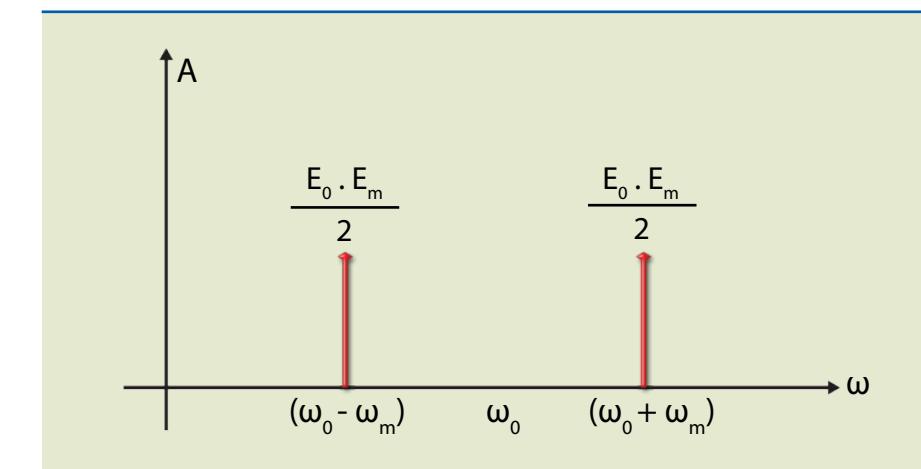


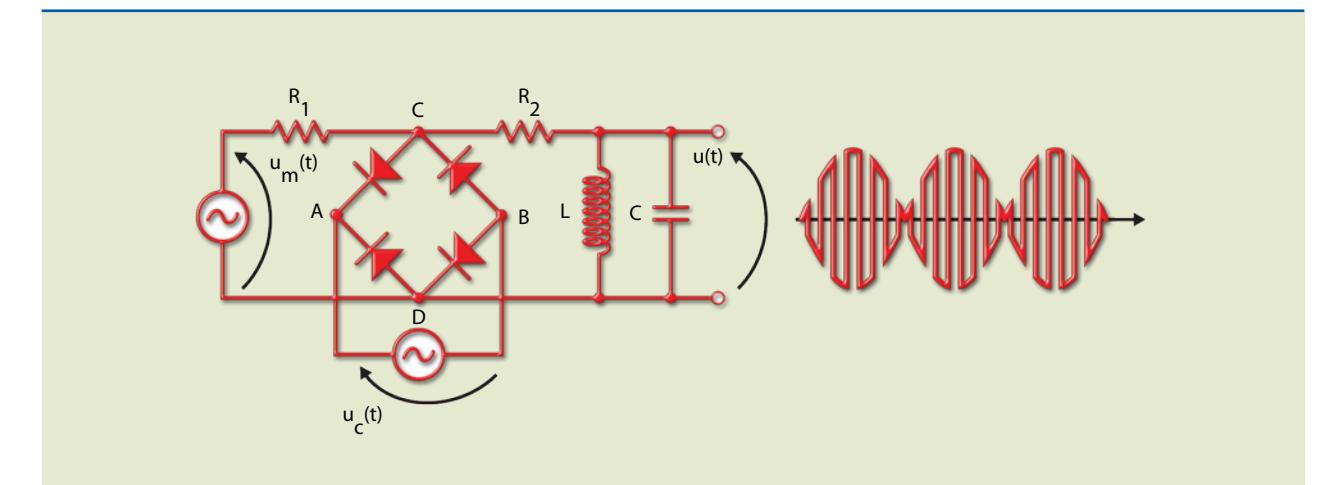
Figura 4.10

Espectro de amplitudes do AM-DSB/SC.

No caso do AM-DSB/SC, há dois tipos de moduladores: em ponte e balanceado. No **modulador em ponte**, a portadora é que determina se os diodos conduzem ou não. Se e_0 é maior que zero, os diodos permanecem reversamente polarizados (corte) e, assim, na saída se obtém a informação (figura 4.11). Se e_0 é menor que zero, os diodos permanecem diretamente polarizados (condução) e, portanto, na saída se obtém sinal zero.

Figura 4.11

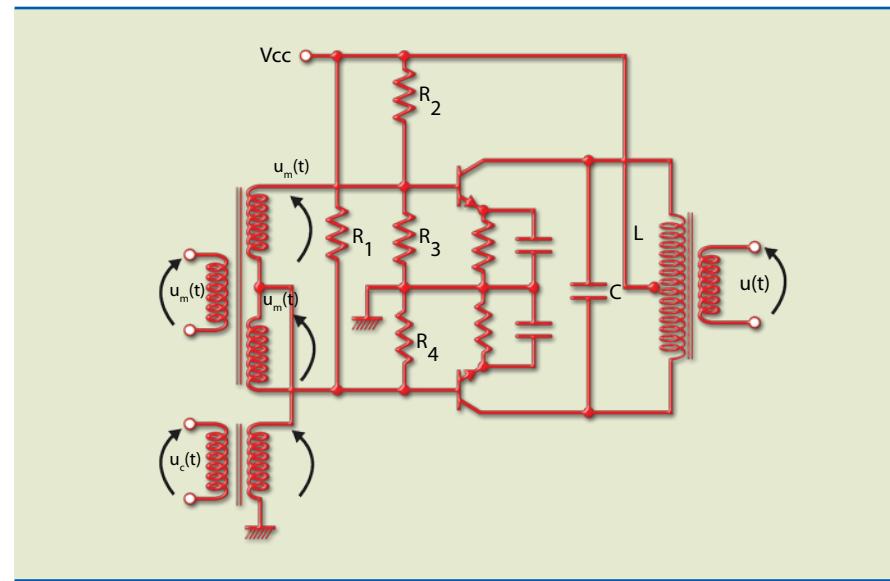
Círcuito modulador em ponte.



O **modulador balanceado** consiste na contraposição de dois moduladores quadráticos, o primeiro com a soma dos sinais da informação e da portadora e o segundo com a diferença desses sinais. Os transistores, por não serem componentes lineares, geram harmônicas de várias frequências ($f_m + f_0$, $f_0 - f_m$, f_0 , f_m , $2 \cdot f_0$, $2 \cdot f_0 \pm f_m$). Por causa da contraposição dos transistores, os sinais em torno de f_0 se anulam, cancelando a portadora. O filtro LC, então, retira as demais harmônicas e deixa passar somente as bandas laterais ($f_0 + f_m$ e $f_0 - f_m$), resultando no sistema AM-DSB/SC (figura 4.12).

Figura 4.12

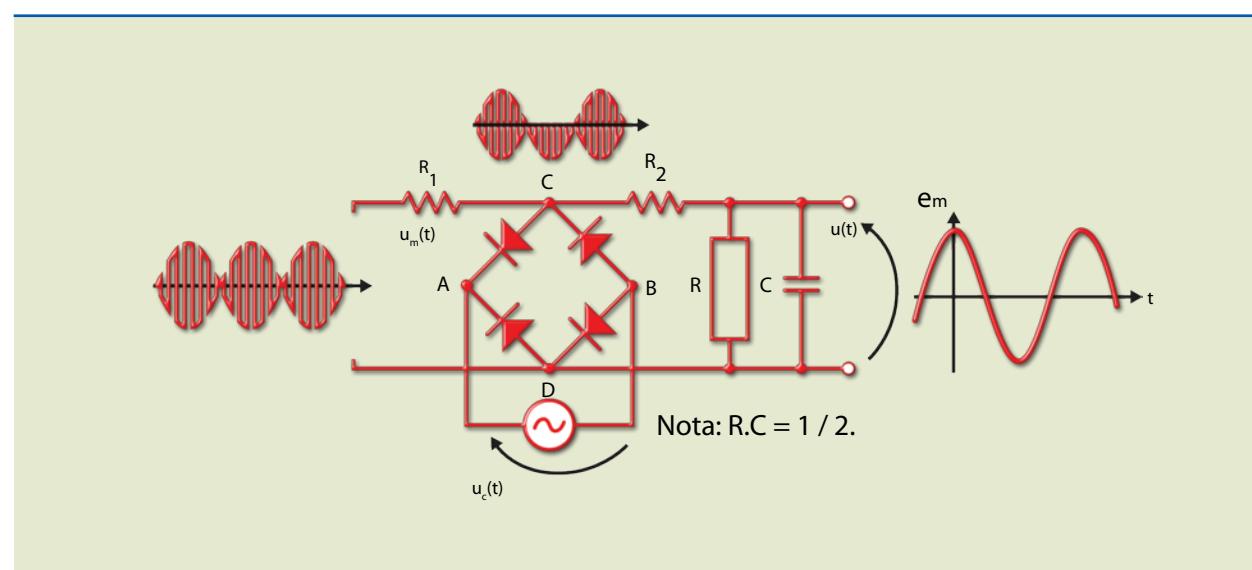
Círculo modulador balanceado.

**Figura 4.13**

Círculo demodulador em ponte.

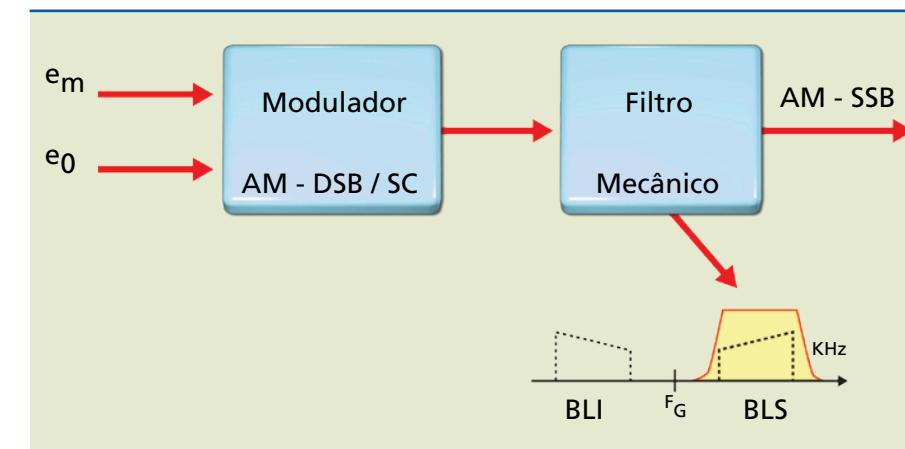
Para garantir que a portadora seja cancelada, é necessário que os dois transistores sejam iguais, o que se obtém mais facilmente utilizando circuitos integrados.

A figura 4.13 apresenta como exemplo o circuito demodulador em ponte.



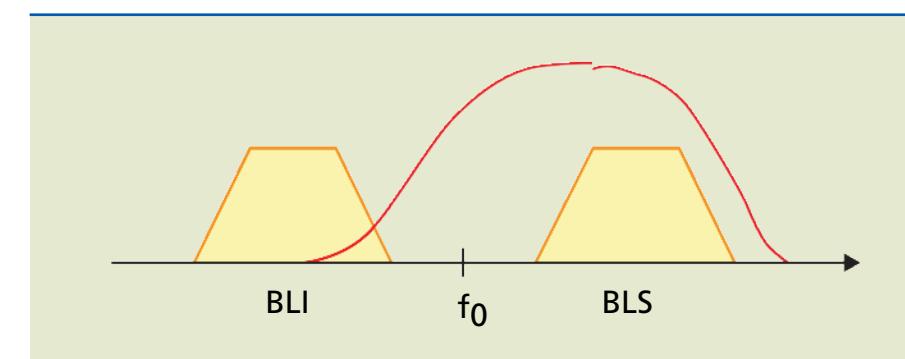
4.1.3 AM-SSB (amplitude modulation – single side band)

De maneira análoga ao AM-DSB, o AM-DSB/SC transmite duas bandas laterais, porém apenas uma das bandas contém a informação. Portanto, ele não precisa transmitir as duas bandas, ocasionando economia de energia, já que interessa apenas a potência de uma das bandas laterais. Foi, então, implementado o AM-SSB, que contém uma única banda lateral. Uma vez obtido o sinal AM-DSB/SC, ele passa por um filtro mecânico que separa somente uma banda a ser transmitida (figura 4.14). Um exemplo de aplicação do AM-SSB é o radioamadorismo.



4.1.4 AM-VSB (amplitude modulation – vestigial side band)

No modulador de amplitude com vestígio de banda lateral, também obtido da modulação AM-DSB/SC, são transmitidos uma banda lateral completa e um vestígio da outra banda lateral. Um exemplo de aplicação do AM-VSB é a transmissão de sinais de televisão (figura 4.15).

**Figura 4.15**

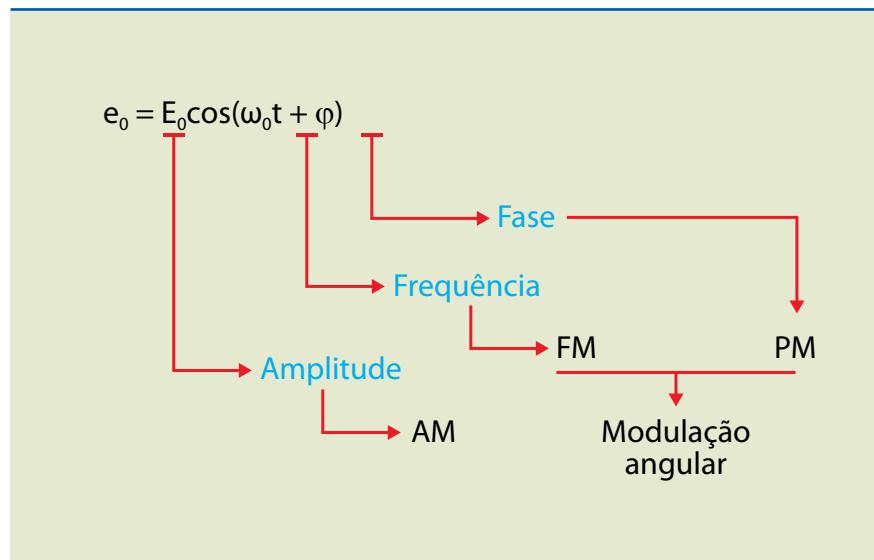
Representação esquemática do sinal BLI e BLS.

4.2 Modulação angular

Os métodos de modulação angular consistem em sistemas de modulação em fase (PM – *phase modulation*) e de modulação em frequência (FM – *frequency modulation*). De forma resumida, temos a figura 4.16.

Figura 4.16

Partes que compõem o sistema de modulação em fase.



Expressões matemáticas:

a) Modulação em frequência:

$$e_{FM} = E_0 \cdot \cos[(\omega_0 + K_\omega \cdot e_m) \cdot t]$$

↓ Constante de modulação [rad/s/V]

b) Modulação em fase:

$$e_{PM} = E_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + K_p \cdot e_m)$$

↓ Constante de modulação [rad/s/V]

4.3 FM faixa estreita

Os principais causadores da degradação de um sinal modulado são os que alteram sua amplitude de forma indesejável, como o ruído e a distorção não linear. Como a modulação em amplitude está diretamente relacionada com a amplitude do sinal modulado, tanto o ruído como a distorção não linear são fatores que influenciam negativamente a qualidade do sinal demodulado.

Em razão desses fatores, iniciou-se o estudo da implementação de sistemas de transmissão em frequência, os quais se tornaram imunes aos ruídos indesejados.

Supondo $e_m = E_m \cdot \cos(\omega_m \cdot t)$

$$e_{FM} = E_0 \cdot \cos[\omega_0 + K_\omega \cdot E_m \cdot \cos(\omega_m \cdot t) \cdot t]$$

↓ e_m

$$e_{FM} = E_0 \cdot \cos[\omega_0 \cdot t + \beta \cdot \sin(\omega_m \cdot t)]$$

em que:

$$\beta = \text{funções de Bessel} = \omega_d / \omega_m = K_\omega \cdot E_m / \omega_m = \text{índice de modulação}$$

Lembrando que $\cos(A + B) = \cos A \cdot \cos B - \sin A \cdot \sin B$, temos:

$$e_{FM} = E_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \cdot \cos[\beta \cdot \sin(\omega_m \cdot t)] - E_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) \cdot \sin[\beta \cdot \sin(\omega_m \cdot t)]$$

Caso particular: $\beta \leq 0,2$ (FM faixa estreita)

$$e_{FM} = E_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) - E_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) \cdot \sin(\omega_m \cdot t)$$

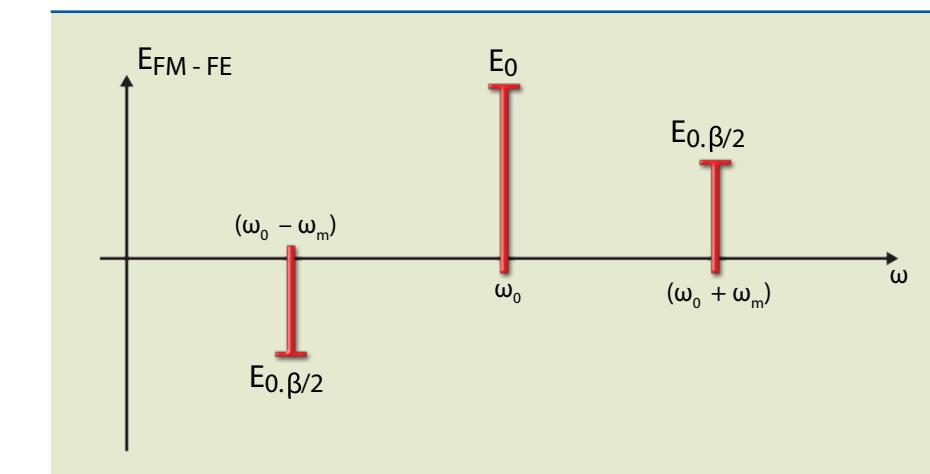
Lembrando da relação do produto entre os senos de dois ângulos:

$$\sin A \cdot \sin B = \frac{1}{2} [\cos(A - B) - \cos(A + B)],$$

a expressão do FM faixa estreita é:

$$e_{FM-FE} = E_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) - \frac{1}{2} [E_0 \cdot \beta \cdot \cos[(\omega_0 - \omega_m) \cdot t] + \frac{1}{2} [E_0 \cdot \beta \cdot \cos[(\omega_0 + \omega_m) \cdot t]]$$

Da expressão geral, obtém-se o espectro de amplitudes do FM faixa estreita (figura 4.17).

**Figura 4.17**

Espectro de amplitudes do FM faixa estreita (uma das bandas possui fase invertida).

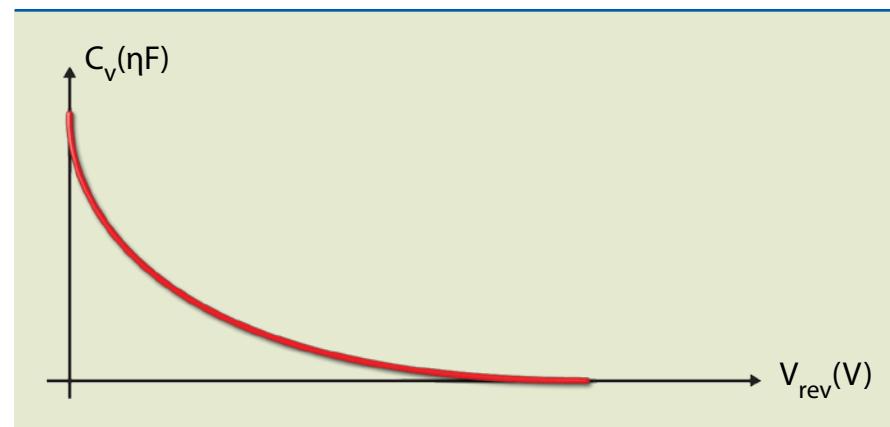
A princípio, o **modulador FM** é um circuito muito simples, formado por um oscilador controlado por tensão (VCO – *voltage controlled oscillator*) e um amplificador de alta potência para a transmissão do sinal modulado.



A base de um circuito VCO é o componente conhecido como diodo varicap, que é um diodo de grandes dimensões cuja principal característica é a variação de sua capacidade de junção em função da tensão reversa nele aplicada, conforme mostra o gráfico da figura 4.18.

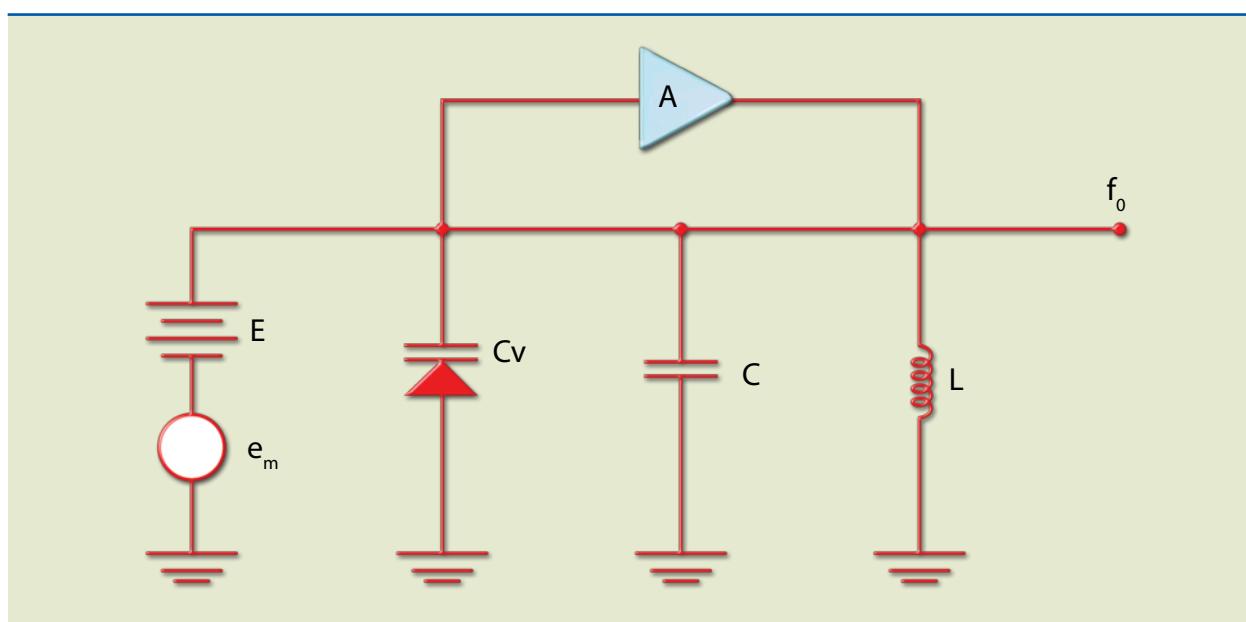
Figura 4.18

Gráfico de capacidade versus tensão.

**Figura 4.19**

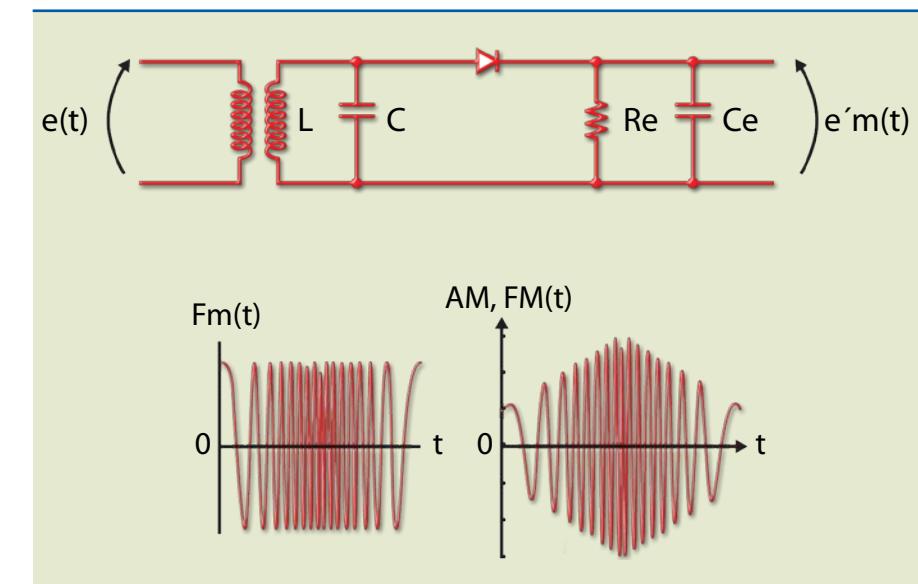
Círcuito modulador de FM.

Uma possibilidade de implementação do modulador FM é o circuito da figura 4.19.



Para realizar a demodulação de um sinal FM, são necessários circuitos conhecidos como detectores de FM, descritos a seguir.

O **discriminador de frequências** é um circuito que converte linearmente variações de frequência em variações de amplitude. Desse modo, um sinal FM é convertido em um pseudossinal AM, sendo possível utilizar um detector de envoltória para a demodulação. No **detector de inclinação**, o objetivo é transformar o sinal modulado FM em um sinal AM e recuperar a informação utilizando um detector de envoltória (figura 4.20).

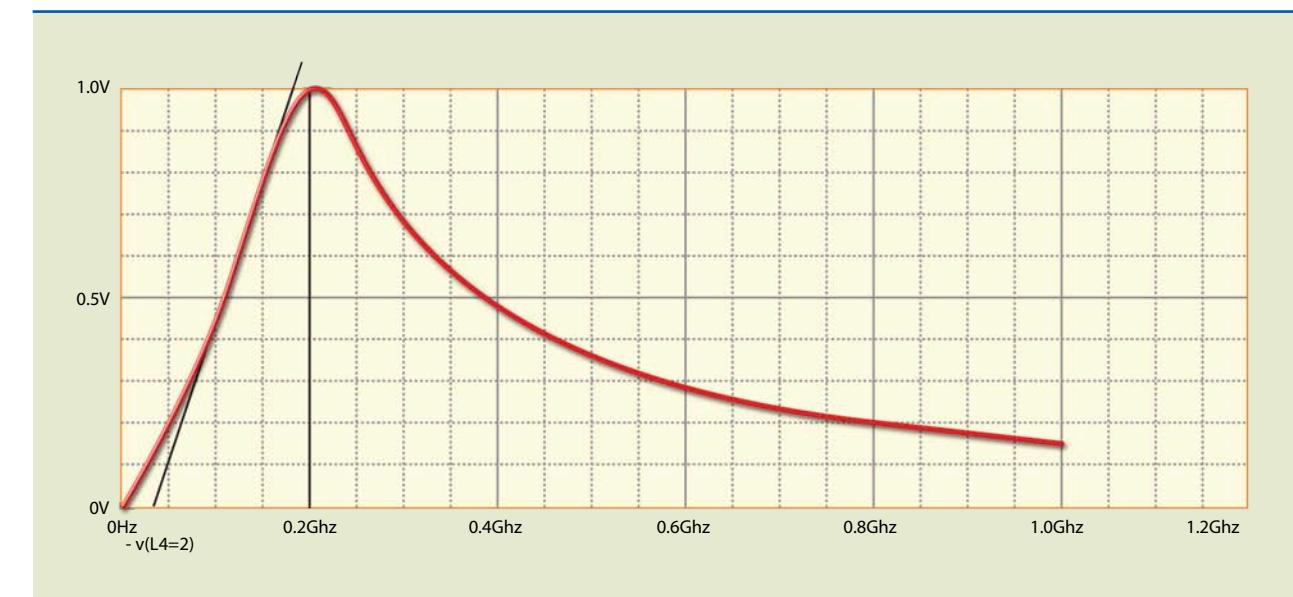
**Figura 4.20**

Detector de envoltória e respectivos sinais FM e AM.

O circuito sintonizado LC tem a resposta em frequência ilustrada na figura 4.21.

Figura 4.21

Aparência do sinal LC.



Esse tipo de circuito apresenta as seguintes desvantagens:

- Os desvios de frequências a serem detectados devem ser suficientemente pequenos.
- A região considerada linear não é por completo e produz razoável distorção na saída.

A fim de expandir a região linear e proporcionar melhor qualidade de detecção de sinal, foi implementado o **círculo detector de inclinação balanceado** (figura 4.22).

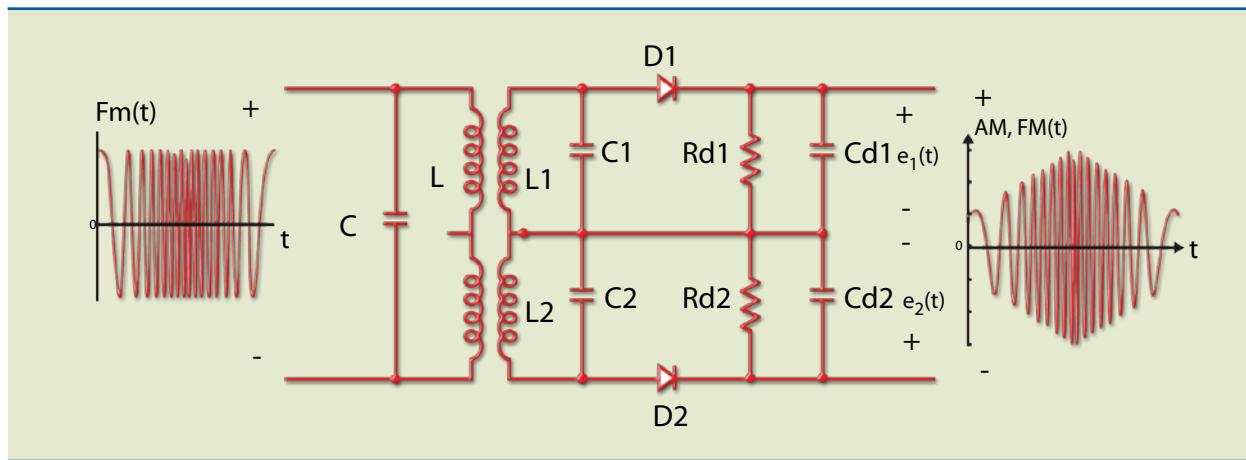


Figura 4.22
Círculo detector de inclinação balanceado e os sinais de entrada e saída.

Nesse circuito, o conjunto L-C está sintonizado na frequência da portadora f_0 ; L_1-C_1 , em uma frequência acima de f_0 ; e L_2-C_2 , em uma frequência abaixo de f_0 (figura 4.23).

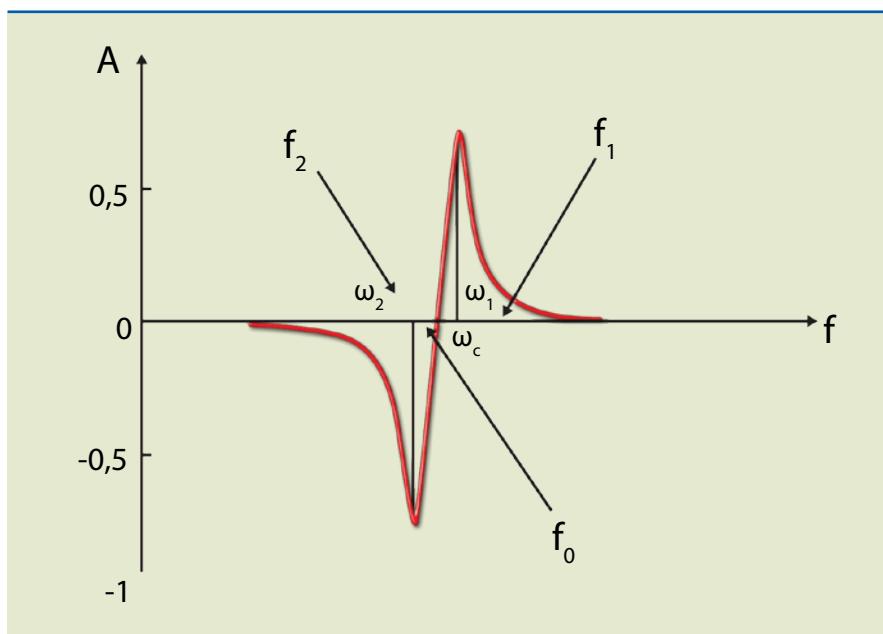


Figura 4.23
Resposta em frequência dos circuitos L_1-C_1 e L_2-C_2 .

A desvantagem do circuito detector de inclinação balanceado é possuir três circuitos sintonizados, o que torna a calibração difícil e trabalhosa.

Devemos sempre lembrar que, para a transmissão FM comercial, a distância em frequência entre as emissoras é de 75 kHz; portanto, $f_d = 75 \text{ kHz}$ e:

$$\beta = \text{funções de Bessel} = \omega_d / \omega_m = 2 \cdot \pi \cdot f_d / 2 \cdot \pi \cdot f_m \quad (4.6)$$

em que:

- f_d é a frequência de desvio;
- f_m , a frequência de informação.

Outro fator importante é que, de maneira análoga ao AM, o FM também utiliza o processo de batimento de frequências para possibilitar a sintonia da emissora desejada, porém a frequência do oscilador local é de 10,7 MHz.

Como vimos, o circuito demodulador é um pseudo-AM e, por esse motivo, sua distribuição de potência não é uniforme, sendo mais intensa nas frequências mais altas. Uma forma de equalizar a distribuição da potência de ruído demodulado consiste em passar o sinal por um filtro passa-baixa RC com $F_{3\text{dB}} \ll B$. Tal procedimento, entretanto, produz distorção linear no sinal demodulado, a qual é corrigida com a transmissão do sinal modulado por outro circuito RC com característica passa-alta antes da modulação. Esses circuitos são denominados **pré-ênfase** e **de-ênfase**, respectivamente (figura 4.24).

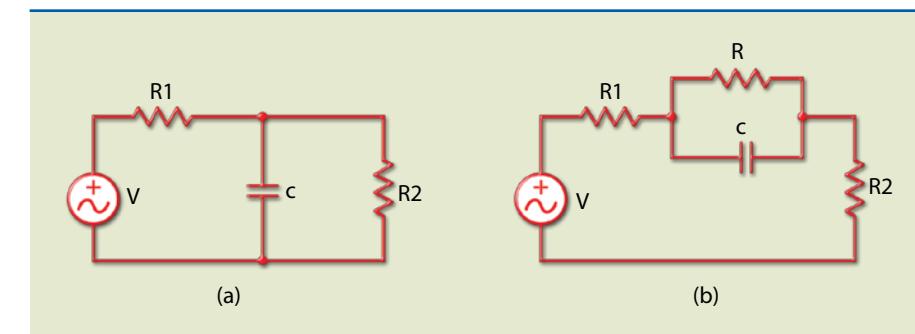


Figura 4.24
Circuitos em
(a) pré-ênfase e
(b) de-ênfase.

4.4 Modulação digital

Em se tratando da transmissão de sequências de bits, os processos de modulação são otimizados a fim de reduzir a largura de faixa de frequências ocupada pelo sinal a ser transmitido sem provocar distorções ou deixar a informação suscetível ao ruído. Existem duas maneiras básicas de transmitir dados, os quais podem ser não modulados (sem portadora) ou modulados (com portadora). Os sinais modulados por portadoras de alta frequência são:

- ASK (*amplitude shift keying*).
- FSK (*frequency shift keying*).
- PSK (*phase shift keying*).
- QAM (*quadrature amplitude modulation*).

Os sinais digitais podem ser formados por pulsos retangulares, cada um deles com duração finita igual à duração de um bit, impossibilitando interferência entre pulsos subsequentes. Tal fato é desejável na transmissão de dados, visto que um pequeno desvio de sincronismo na demodulação não provocará erros. Essa vantagem, entretanto, tem como custo adicional a ampla largura de faixa de frequências ocupada no espectro, pois, conforme a série de Fourier, todo sinal periódico pode ser decomposto pela somatória de infinitas harmônicas múltiplas da harmônica fundamental que compõe o sinal, acrescido de sua harmônica fundamental.

A partir do momento em que se tenta reduzir a largura de faixa por meio de um filtro passa-baixa, os pulsos retangulares são distorcidos e sua duração aumenta.



Como consequência, ocorre o fenômeno denominado **interferência intersimbólica**, pela própria decomposição dos bits em infinitas cossenoides, conforme a série de Fourier, em que os pulsos são associados aos bits 0 e 1.

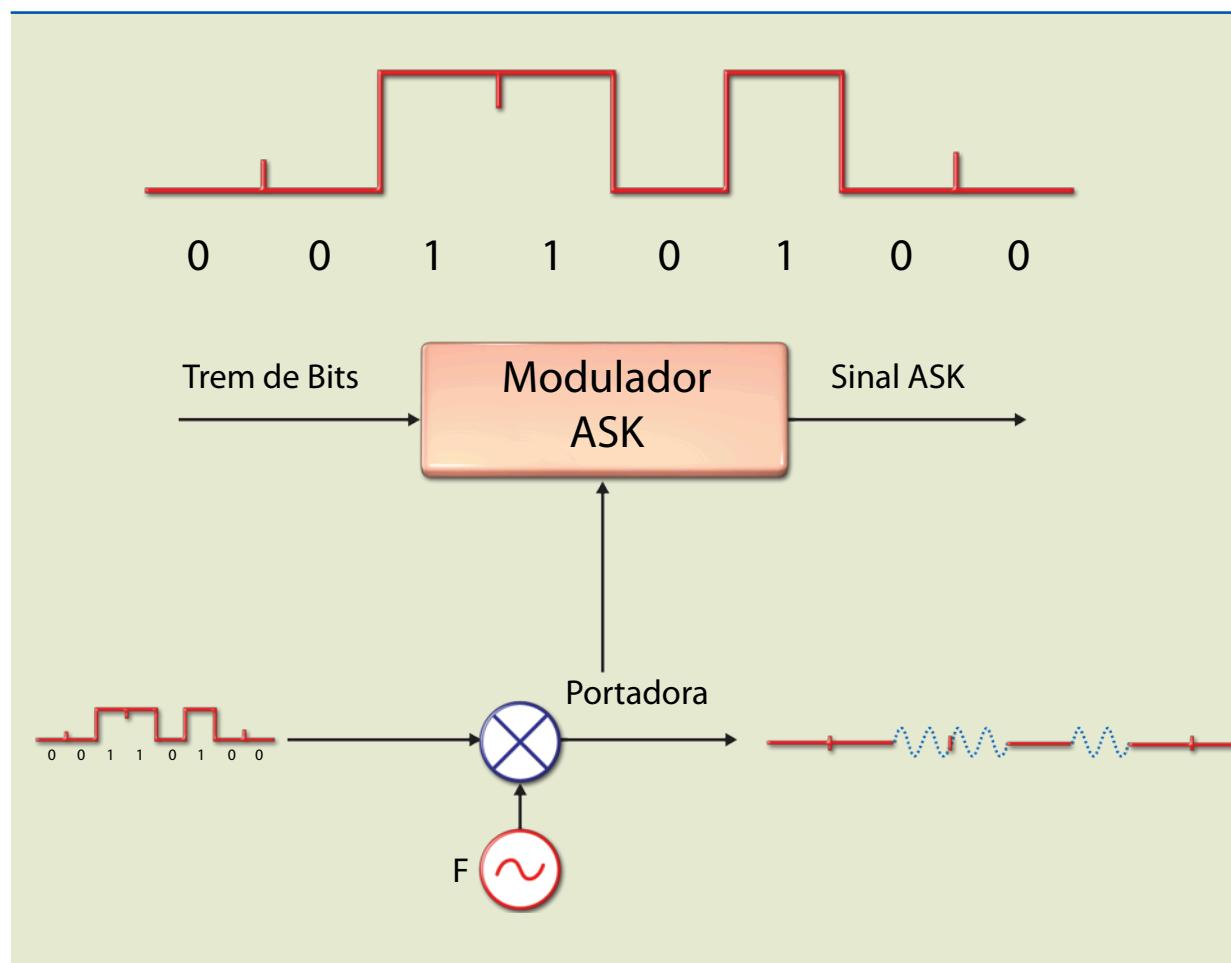
Por esse motivo, foram desenvolvidos os métodos de modulação de trens de bits, apresentados a seguir.

4.4.1 Modulação ASK (amplitude shift keying)

Tomemos como exemplo o trem de bits 0 0 1 1 0 1 0 0. Vimos que a transmissão de bits por meios físicos é difícil, pois tais meios não possuem banda passante infinita, o que gera distorção no sinal recuperado.

Para solucionar essa deficiência, o trem de bits deve ser introduzido em um modulador, o qual modificará o sinal a ser transmitido; onde o nível lógico for 1, será transmitida a frequência cossenoidal da portadora e, onde o nível lógico for 0, será transmitido sinal de amplitude zero.

Figura 4.25
Sinal a ser transmitido pelo meio físico.

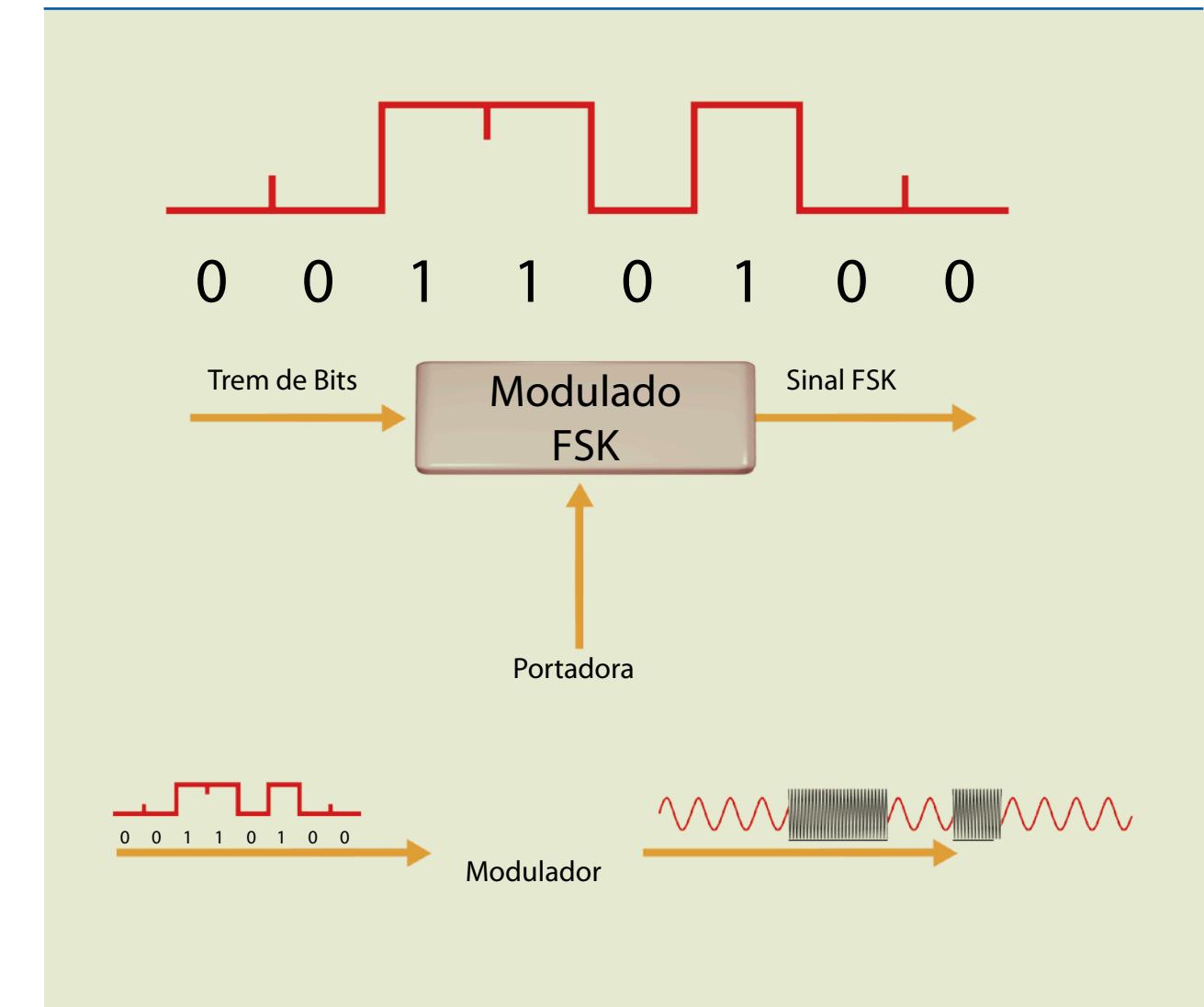


4.4.2 Modulação FSK (frequency shift keying)

De maneira similar à modulação ASK, a modulação FSK também tem por finalidade inserir no meio de transmissão um sinal cossenoidal de frequência finita e conhecida a fim de garantir uma banda passante finita. Entretanto, em vez de variarmos a amplitude da portadora em função dos bits a serem transmitidos, variamos a frequência do sinal da portadora.

A figura 4.26 ilustra o trem de bits 0 0 1 1 0 1 0 0.

Figura 4.26
Sinal a ser transmitido pelo meio físico.

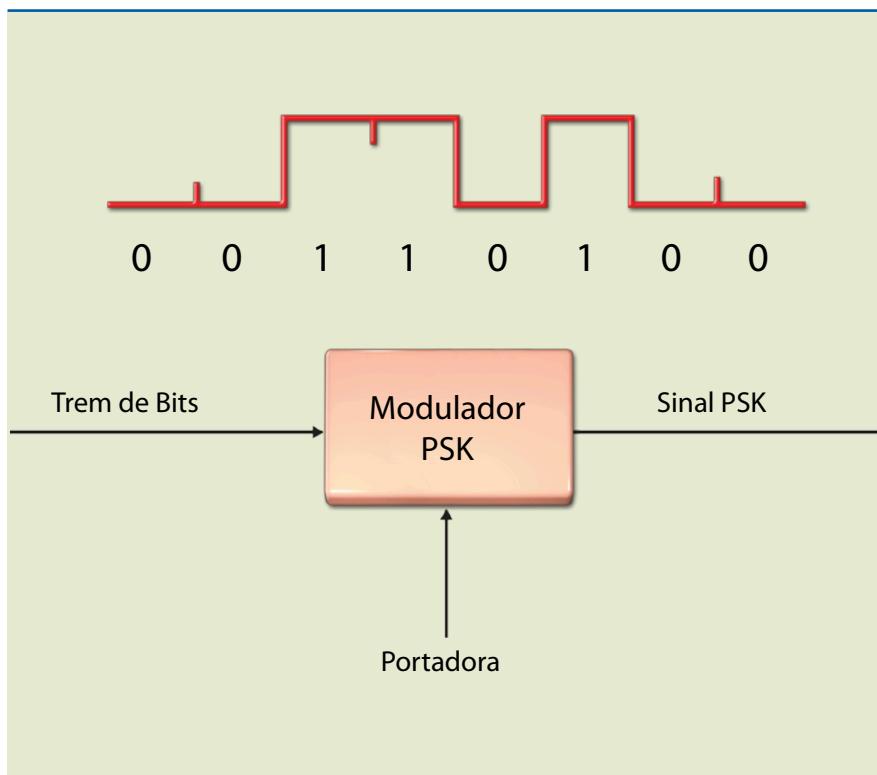


4.4.3 Modulação PSK (phase shift keying)

A modulação PSK também transmite um sinal cossenoidal da portadora em função do trem de pulsos da informação. No entanto, a alteração sofrida pela portadora é em relação à fase do sinal de alta frequência em função da variação do nível lógico do trem de bits. A figura 4.27 apresenta o mesmo trem de bits anterior: 0 0 1 1 0 1 0 0.

Figura 4.27

Sinal a ser transmitido pelo meio físico.



4.4.4 Modulação QAM (*quadrature amplitude modulation*)

Um dos problemas do rádio digital é a necessidade de utilizar uma faixa de transmissão bem mais larga que a de um sistema analógico de mesma capacidade. Uma solução consiste em aumentar o número de estados possíveis do sinal modulado. Entretanto, para manter determinada qualidade de transmissão, expressa em termos da probabilidade de erro de bit, é necessário aumentar a potência de entrada do receptor.

A modulação em amplitude e fase é uma alternativa que permite uma relação satisfatória entre a qualidade e o nível do sinal de recepção. Em relação ao número de estados possíveis, destacam-se o 16 QAM, o 64 QAM, o 128 QAM e o 256 QAM.

Para melhor utilização do espectro, quanto maior a quantidade de estados, maior a eficiência espectral. Contudo, o emprego de sistemas com número de estados elevados é limitado, pois ocorrem problemas como: dispersão do sinal na faixa de transmissão, em decorrência do desvanecimento multipercorso; maior sensibilidade à interferência; e dificuldades de fabricação de moduladores e demoduladores.

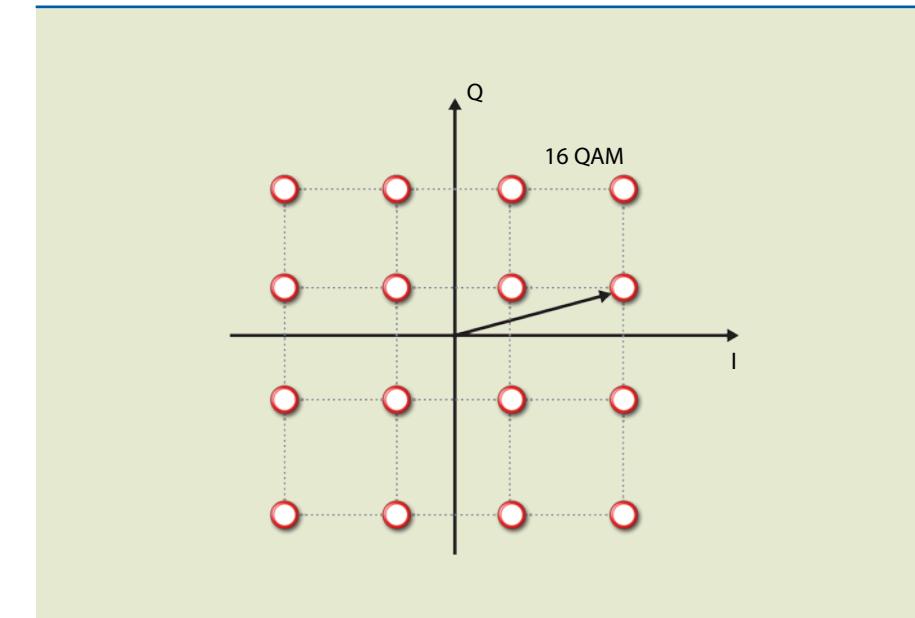
A figura 4.28 ilustra o diagrama fasorial (constelação) da modulação 16 QAM.

O sistema de modulação QAM apresenta a mesma banda e a mesma eficiência de banda do sistema PSK, para um mesmo número de estados do sinal modulado. Entretanto, supera o PSK no desempenho de erro. A comparação das constelações para 16 QAM e 16 PSK, como mostrado na figura 4.29, revela que

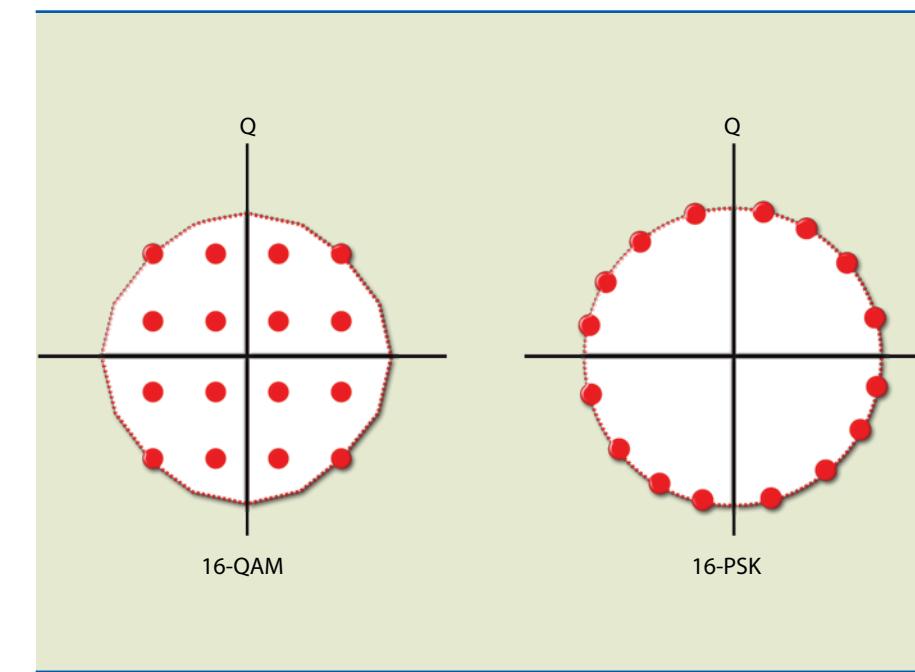
a razão para essa diferença no desempenho de erro está na distância entre pontos do sinal na constelação, pois para o PSK a distância é menor do que a distância entre pontos na constelação QAM.

Figura 4.28

Constelação para a modulação 16 QAM.

**Figura 4.29**

Comparação entre as constelações dos sinais 16 QAM e 16 PSK com o mesmo pico de potência.



Modulação 16 QAM

A modulação 16 QAM é um método combinado de modulação em amplitude e fase que proporciona 4 bits de informação para cada símbolo transmitido e possui 16 estados possíveis. A figura 4.30 apresenta o diagrama em blocos do modulador/demodulador 16 QAM.

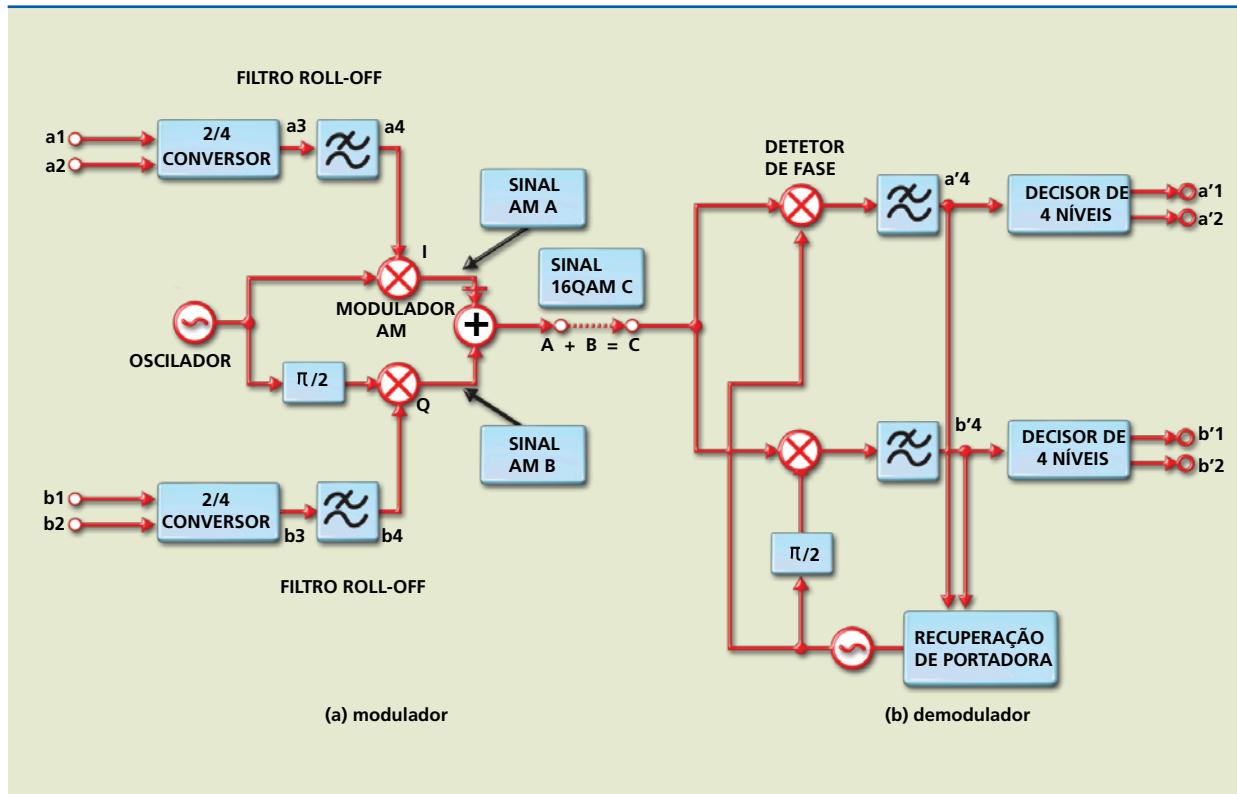
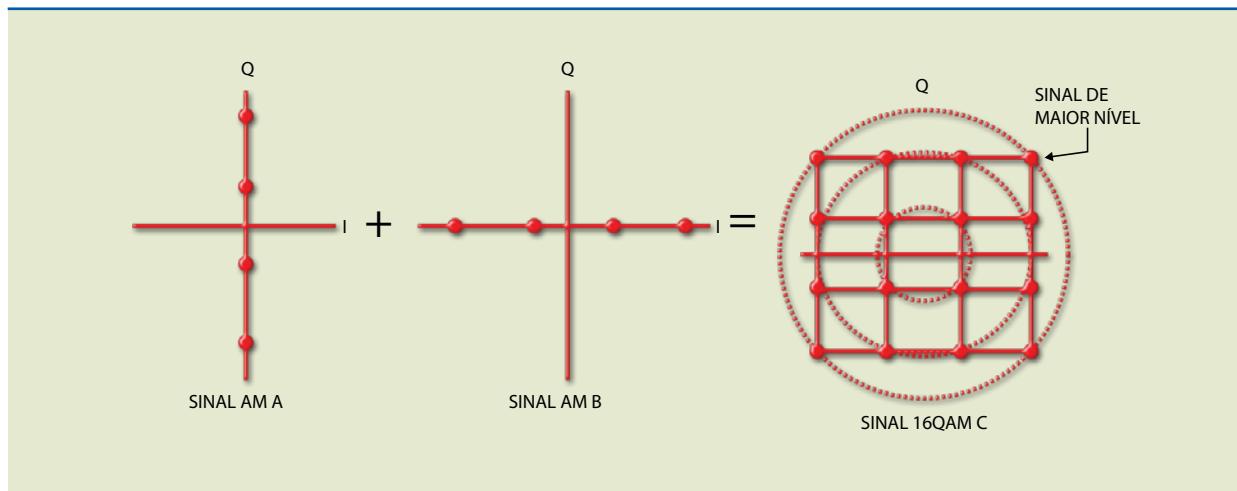
**Figura 4.30**

Diagrama em blocos para 16 QAM:
(a) modulador e
(b) demodulador.

Quatro (dois pares) sinais binários – a_1, a_2, b_1 e b_2 – são aplicados nos conversores $2 \rightarrow 4$ e convertidos em dois sinais de quatro níveis cada um (conversão digital-analógico). Esses sinais são limitados em banda por um filtro de Nyquist (cosseno levantado), fazendo com que a interferência intersímbólica no instante de amostragem seja zero (ideal). As portadoras em fase (I) e em quadratura (Q) são moduladas em amplitude pelos sinais a_4 e b_4 . Combinando esses dois sinais modulados em amplitude – A e B –, obtém-se, então, o sinal 16 QAM C. A obtenção do sinal modulado em 16 QAM a partir de dois sinais em quadratura modulados em amplitude é apresentada na figura 4.31, que também mostra que o sinal 16 QAM possui três níveis discretos de amplitude.

Figura 4.31

Formação da constelação para 16 QAM.

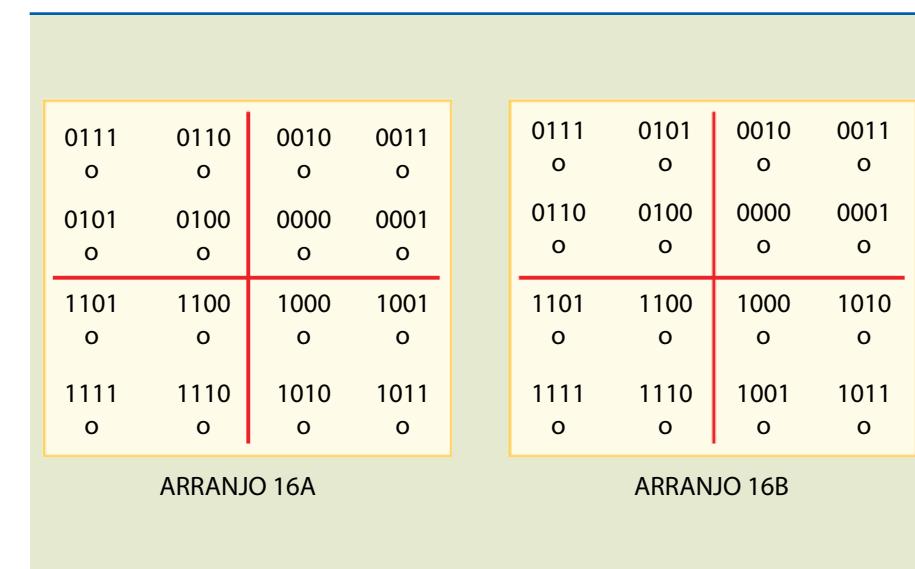


A demodulação 16 QAM é efetuada recuperando a portadora de referência a partir do próprio sinal recebido e injetando-a em quadratura nos detectores I e Q. Desse modo, obtém-se os sinais a'_4 e b'_4 , que podem possuir quatro níveis distintos, cada um deles correspondendo a um valor binário. Os sinais são então limitados em banda e encaminhados a circuitos decisores, que produzem pares de bits em função do nível dos sinais a'_4 e b'_4 , presentes em suas entradas. Os pares de bits produzidos pelos decisores são a informação demodulada.

Convém salientar que, para o circuito de recuperação da portadora, a simples multiplicação por 4 do sinal modulado não funciona com segurança para 16 QAM. Isso ocorre porque a composição vetorial de sinais em quadratura só produz fases de $\pm 45^\circ$ ou $\pm 135^\circ$, quando as amplitudes dos sinais I e Q são iguais. Na figura 4.31, podemos verificar a variedade de fases do sinal modulado em 16 QAM. Dessa maneira, normalmente utilizam-se técnicas mais avançadas para os circuitos de recuperação da referência de fase para a portadora local. Para os sistemas m-PSK ($m \geq 4$) e QAM, é comum usar como circuito gerador da referência de fase local o Costas loop.

No entanto, todos esses processos de transmissão criam ambiguidades de fase na portadora recuperada. Por isso, costuma-se codificar diferencialmente os dados na transmissão antes da modulação e decodificá-los diferencialmente após a demodulação.

Para a modulação 16 QAM, existem formas de combinar os bits ao longo da constelação, gerando dois arranjos (figura 4.32).

**Figura 4.32**

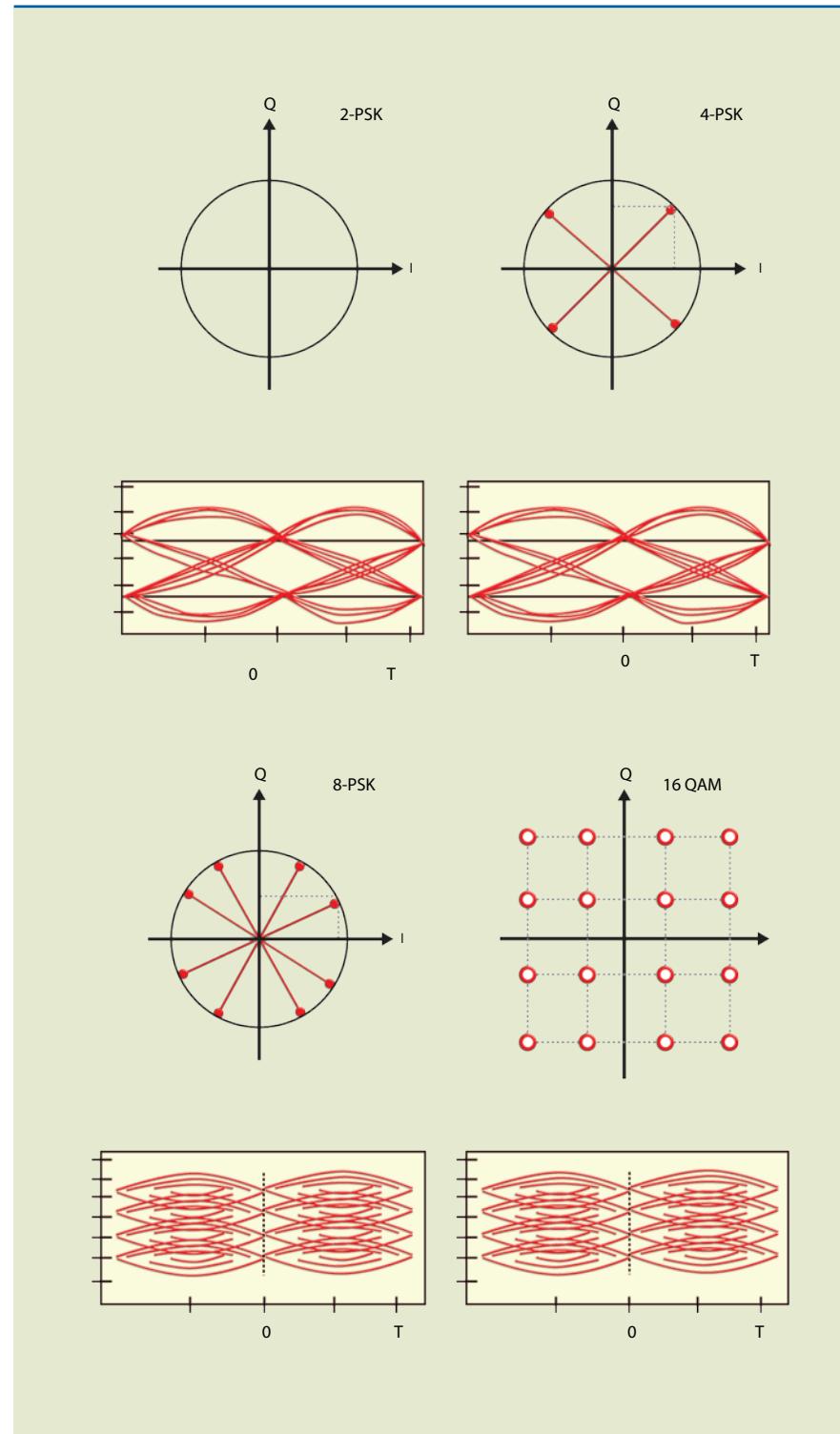
Arranjos-padrão para modulação 16 QAM.

Para demonstrar a importância da fase da portadora, da forma do pulso e do instante de amostragem na detecção, apresentam-se alguns diagramas de “olho” com as respectivas constelações na figura 4.33. Cada diagrama ilustra a saída de um dos filtros passa-baixa, em que os traços superpostos representam as saídas de diferentes valores de dados.

Os “olhos” são os espaços brancos em forma de diamante que ocorreram a cada T segundos. Os extremos verticais de cada olho indicam os níveis ideais (sem distorção) da portadora modulada, e os pontos médios verticais, os limiares de decisão entre níveis da portadora modulada. O instante ótimo de amostragem em cada período de dados está localizado no ponto médio horizontal dos olhos.

Figura 4.33

Constelações e diagramas de olho para modulações PSK e 16 QAM.

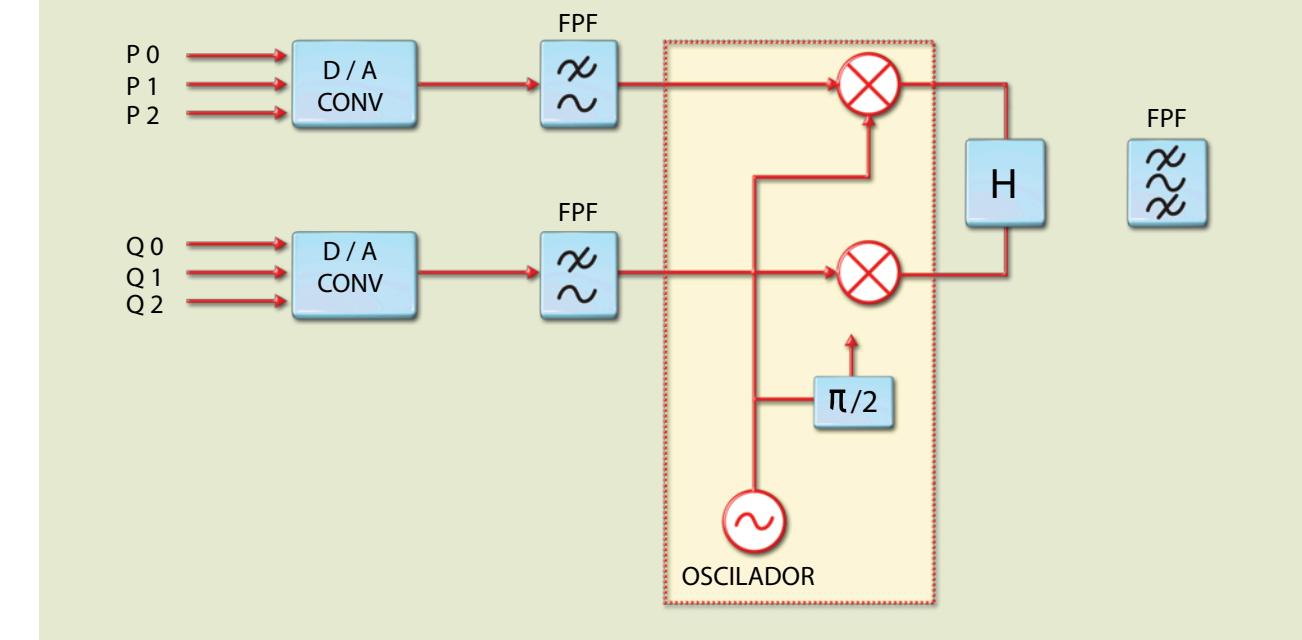


Modulação 64 QAM

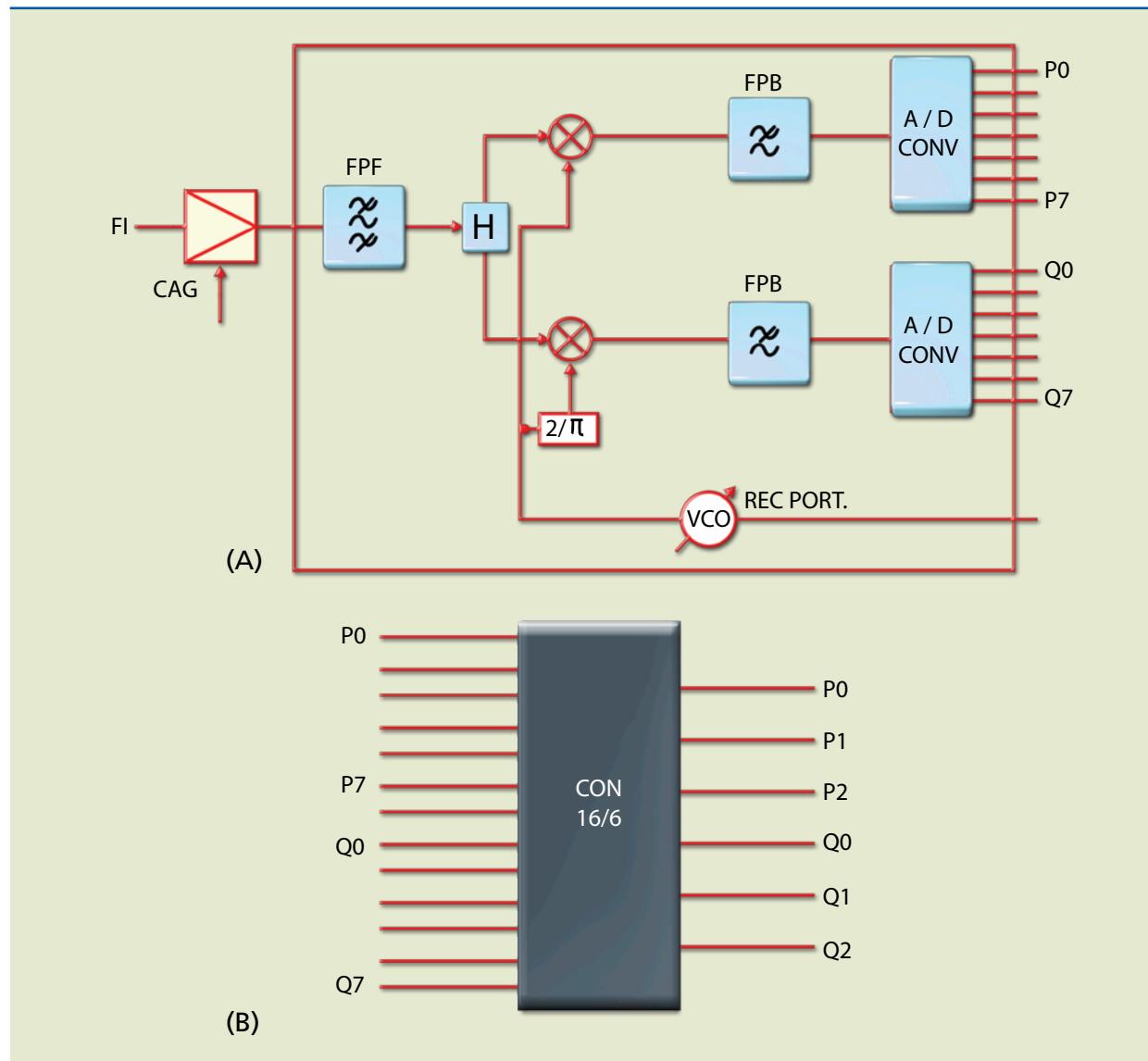
A modulação 64 QAM é uma modulação em amplitude por quadratura de 64 níveis com 6 bits de informação para cada símbolo transmitido (figura 4.34).

Figura 4.34

Diagrama em blocos do modulador 64 QAM.



O demodulador 64 QAM realiza detecção coerente. Assim, o sinal de FI na entrada tem nível constante devido ao CAG e passa por um filtro passa-faixa para limitar a faixa. A híbrida divide o sinal em dois e faz o batimento para a recuperação dos dados (figura 4.35).

**Figura 4.35**

Demodulador 64 QAM:
(a) circuito interno e (b)
identificação dos pinos.

4.4.5 Cálculo da largura de banda

Outra característica importante das modulações digitais é a faixa necessária para a transmissão. A faixa mínima para transmitir bits de duração T_b é igual a:

$$B = \frac{1}{2 T_b} \quad (\text{critério de Nyquist}) \quad (4.7)$$

em que $1/T$ é a taxa de bits ou velocidade de transmissão (VT).

Para a transmissão por rádio, a banda mínima (BR) necessária após a modulação corresponde a:

$$BR = 2B = \frac{1}{T_b} = VT \quad (4.8)$$

Para a transmissão multinível, cada estado do sinal modulado (símbolo) carrega m informações de bits; portanto:

$$m = \log_2 MTS = Tb \cdot \log_2 M \quad (4.9)$$

em que M é o número de estados do sinal modulado.

Então:

$$BR = \frac{1}{TS} = \frac{1}{Tb \cdot \log_2 M} = \frac{VT}{\log_2 M}$$

Os filtros descritos por Nyquist não têm aplicação prática e, por isso, utilizam-se filtros que acarretam aumento na banda de transmissão de um fator α chamado de **fator de roll-off**. Assim, as relações anteriores passam a ser:

para o sinal binário:

$$B = \frac{1+\alpha}{2Ts} \quad BR = \frac{1+\alpha}{Ts} \quad (4.10)$$

para o caso geral:

$$BR = \frac{1+\alpha}{Tb \cdot \log_2 M} = \frac{Vt \cdot (1+\alpha)}{\log_2 M} \quad (4.11)$$

Como podemos observar, a codificação em maior número de níveis, correspondendo à modulação em maior número de estados, reduz a faixa necessária para a transmissão a uma mesma velocidade de sinal (mesma taxa em bits/s). Entretanto, o efeito do ruído se torna mais crítico quando se aumenta o número de estados que mantém constante a amplitude da portadora, ou seja, a potência transmitida.

4.4.6 Detecção de sinais binários

O processo de modulação tem por objetivo deslocar o sinal modulante para uma faixa de frequências adequadas à transmissão pelo meio escolhido. No receptor, é preciso inverter esse processo ou demodular o sinal para recuperar a informação original (trem de pulsos) transmitida. Em geral, esse processo de demodulação é chamado de detecção.

Existem essencialmente dois métodos usuais de demodulação. Um deles é a **detecção coerente ou síncrona**, que consiste na multiplicação do sinal de entrada pela frequência da portadora, gerada localmente no receptor, e na filtragem em passa-baixa do sinal resultante da multiplicação. O outro método é a **detecção de envoltória**, em que se aplica o sinal modulado em um

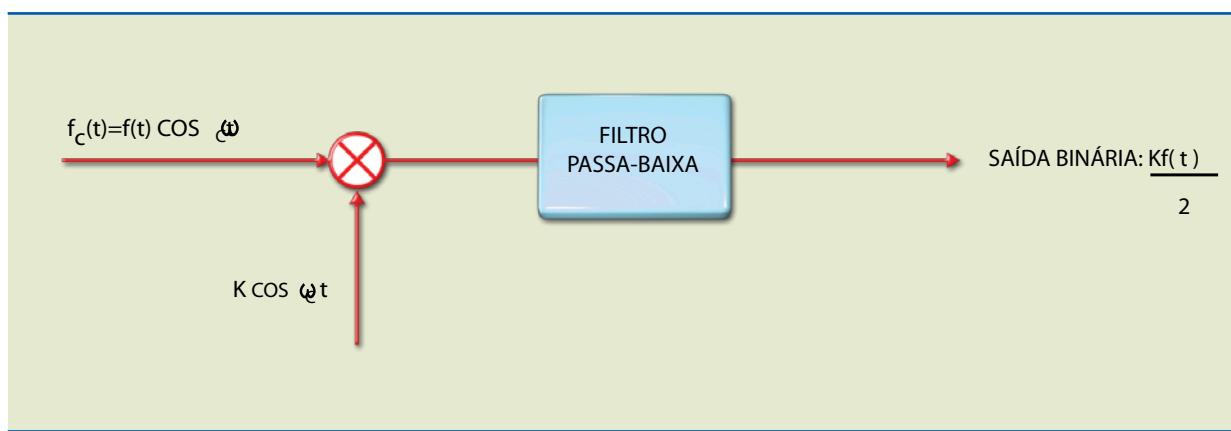
dispositivo não linear seguido por um filtro passa-baixa. Essa técnica tem a finalidade de recuperar a envoltória do sinal, na qual há informação impressa na amplitude e na fase. Assim, os sistemas PSK e QAM necessitam de detecção coerente ou síncrona.

Para demonstrar o método síncrono, vamos admitir que um sinal binário (PSK) de alta frequência tem a forma representada na figura 4.36.

Figura 4.36

Esquema geral de detecção síncrona.

$$f_c(t) = f(t) \cos \omega_c t$$



Considera-se $f(t) = \pm 1$.

Multiplicando esse sinal por $K \cos \omega_c t$ (K é uma constante arbitrária do multiplicador), obtemos:

$$Kf(t) \cdot \cos^2 \omega_c t = (K/2) \cdot (1 + \cos 2\omega_c t) \cdot f(t) \quad (4.12)$$

Contudo, o tempo $\cos 2\omega_c t$ representa $f(t)$ deslocada para a frequência $2f_c$, a segunda harmônica da frequência da portadora f_c . Esse componente é rejeitado pelo filtro passa-baixa e a saída resultante é $(K/2) f(t)$, que é exatamente a sequência de pulsos de banda básica que se desejava obter. O fator constante $(K/2)$ não tem significado algum, pois o sinal sempre pode ser amplificado ou atenuado de qualquer valor especificado. Assim, o detector síncrono executa a tarefa de reproduzir o sinal $f(t)$.

Observe que nessa discussão admitiu-se que a portadora gerada localmente, $\cos \omega_c t$, tinha exatamente a mesma frequência e a mesma fase que a portadora do sinal de entrada. Se a onda senoidal gerada localmente tivesse frequência $\cos(\omega_c + \Delta\omega)$, a multiplicação produziria:

$$Kf(t) \cdot \cos(\omega_c + \Delta\omega) t \cdot \cos \omega_c t = (K/2) \cdot [\cos(2\omega_c + \Delta\omega)t + \cos \Delta\omega t] f(t) \quad (4.13)$$

A saída do filtro passa-baixa seria, então:

$$[Kf(t)/2] \cos \Delta\omega t \quad (4.14)$$

Se $\Delta\omega$ estivesse dentro da banda do filtro, não representaria o sinal desejado. Alternativamente, se o sinal local tivesse a frequência correta ω_c , mas estivesse θ radianos fora de fase, ou seja, $\cos(\omega_c t + \theta)$, a saída do filtro passa-baixa seria:

$$[Kf(t)/2] \cos \theta \quad (4.15)$$

Essa é a saída desejada em banda básica, porém atenuada, pois, à medida que θ aumenta, $\cos \theta$ diminui. Dessa maneira, para θ próximo de $\pi/2$, a saída será muito próxima de zero.

Se θ ultrapassar $\pi/2$, haverá inversão de sinal na saída. Se o sinal em banda básica for uma sequência bipolar, a polaridade de todo o sinal se inverterá, os pulsos 1 se transformarão em 0 e vice-versa.

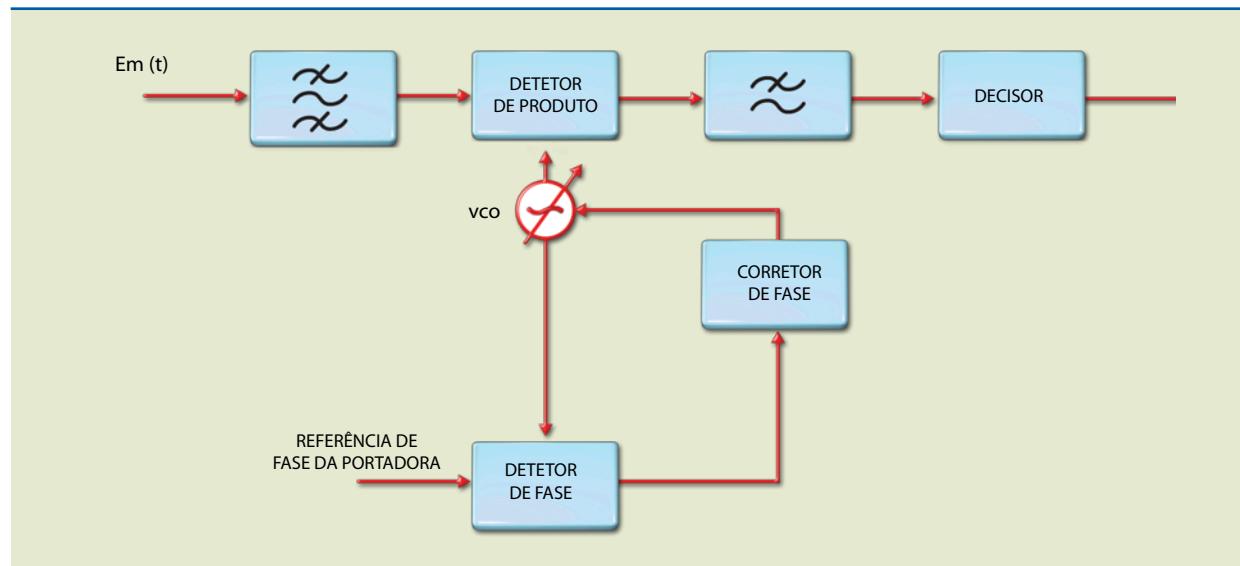
Com base nessa análise, podemos concluir que a portadora gerada localmente deve ser sincronizada em frequência e em fase. Essa é a razão da denominação detecção coerente.

Frequentemente, na literatura técnica, faz-se confusão entre os termos “síncrono” e “coerente”, referindo-se à demodulação síncrona e à demodulação coerente como sinônimos. A distinção entre elas é que na demodulação síncrona a portadora local tem a mesma frequência que a portadora da modulação, enquanto na demodulação coerente, além de essa característica ser necessária, a fase também deve ser igual. Assim, a demodulação coerente é obrigatoriamente uma demodulação síncrona, mas a demodulação síncrona não precisa ser coerente.

Como vimos, é importante garantir a coerência entre a portadora gerada localmente e a portadora gerada na transmissão. Por isso, a melhor solução é aquela em que a portadora local seja perfeitamente sincronizada em frequência e coerente com referência de fase do sinal modulado recebido.

A figura 4.37 apresenta uma forma de evitar o aparecimento da defasagem (θ) citada anteriormente, utilizando a técnica de amarração em fase. Essa técnica exige que se disponha localmente de um sinal de referência de fase da portadora, obtido pela transmissão da informação da portadora por uma via independente ou por um processamento do próprio sinal entrante. A partir da referência local, um sistema de servocorreção, conhecido como PLL, proporciona o sincronismo e a coerência desejados.

O PLL detecta permanentemente a diferença de fase entre a referência da portadora e o oscilador local, cuja frequência e fase dependem de uma tensão de controle, sendo por isso designado como VCO. A diferença de fase é transformada na tensão de controle, que ajusta o VCO, garantindo a coerência de fase dentro do intervalo de precisão desejado. Geralmente, essa técnica exige sofisticação de circuito para estabelecer a referência de fase.

**Figura 4.37**

Detecção síncrona com amarração em fase.

Existe outra técnica mais econômica, conhecida como detecção diferencial. Trata-se de um sistema que realiza uma demodulação coerente diferencial, não havendo portadora na recepção. Nesse caso, seria necessário apenas incluir no demodulador uma estrutura de retardo, com tempo igual à duração de 1 bit. Logicamente, no lado da transmissão deveria ocorrer a codificação diferencial antes da modulação (figura 4.38).

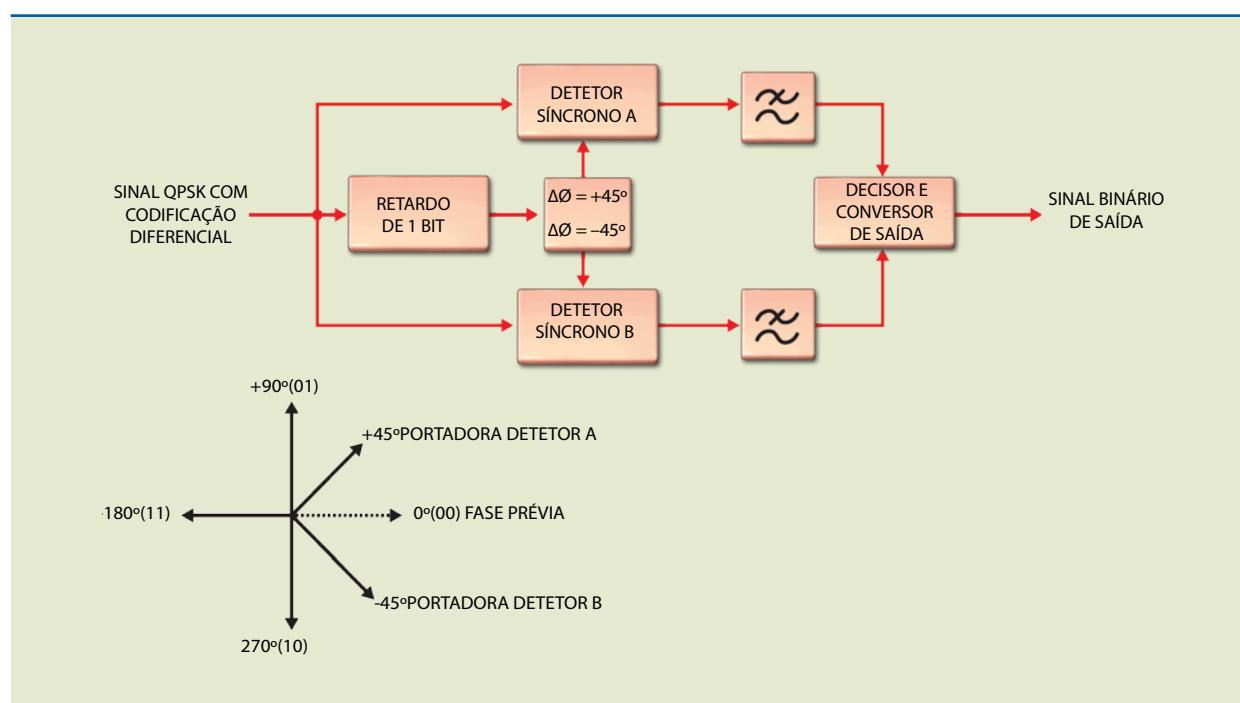
**Figura 4.38**

Diagrama em blocos para o sistema QPSK.

Apesar de apresentar configuração de circuito mais simples, a detecção diferencial, comparada com a detecção coerente, tem desempenho frágil quanto a erro, o qual piora à medida que o número de estados da modulação aumenta.

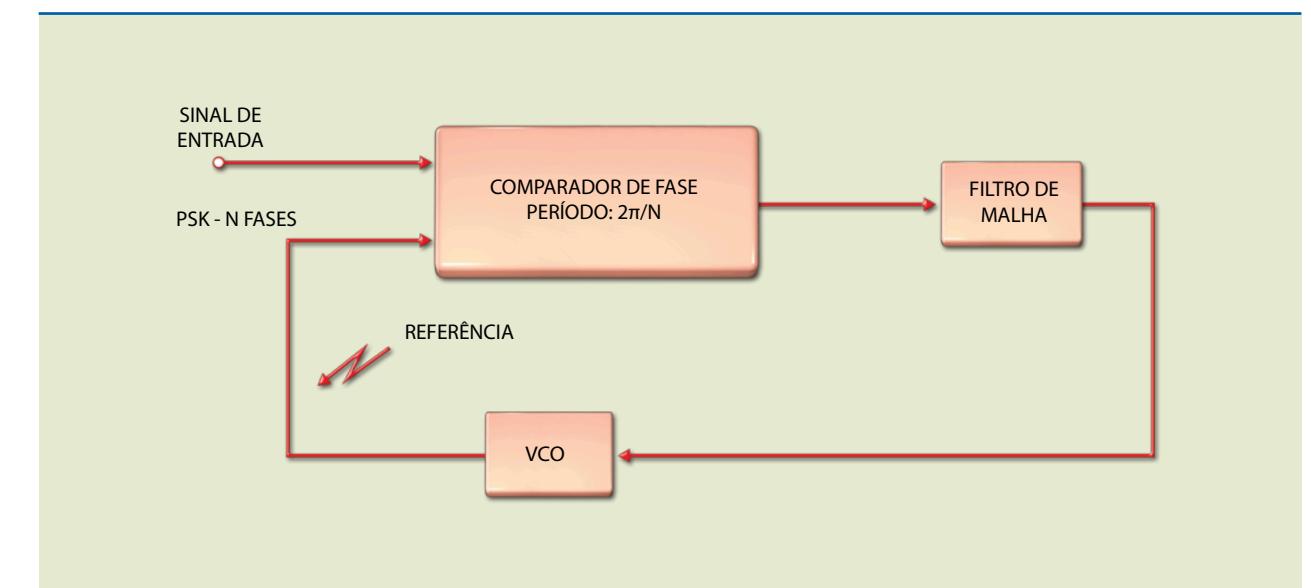
4.4.7 Técnicas de recuperação da portadora

Embora muitos métodos de modulação e demodulação tenham sido considerados, a detecção coerente (para PSK em quadratura e QAM) é a mais utilizada em razão de seu desempenho superior e razoável economia.

Várias configurações de demoduladores coerentes para PSK, principalmente, têm sido propostos, e os resultados relatados revelam que o desempenho do circuito demodulador depende primordialmente da qualidade do circuito de recuperação de referência. Por sua importância para a qualidade do sinal demodulado, o projeto e a implementação desses circuitos são segredos industriais usados como pontos-chave dos equipamentos nas concorrências comerciais.

Descreve-se aqui o método para obter a coerência de fase entre o sinal de múltiplas fases e a fase de um VCO utilizando PLL. Estudaremos os circuitos de recuperação da portadora para o 4 PSK, que é o tipo de modulação empregado nos equipamentos de rádio de baixa e média capacidade (figura 4.39).

Figura 4.39
PLL para recuperação da portadora.



A tensão de saída do comparador de fase deve ser definida somente pela diferença estática de fase entre a onda portadora de entrada e o sinal do VCO. Além disso, os efeitos dos componentes resultantes da modulação devem ser os menores possíveis. Assim, pela teoria do PLL, sabemos que:

- A tensão de saída do comparador de fase deve ser uma função apenas de θ (diferença estática de fase) e periódica a intervalos $2\pi/N$ (em que N é o número de fases).
- A tensão de saída do comparador de fase deve apresentar N pontos zero no intervalo 2π e ser suavemente crescente ou decrescente nos cruzamentos. O lock do PLL é alcançado em cada um desses pontos de tensão zero.
- A característica da saída do comparador deve ter simetria ímpar em relação aos pontos de cruzamento.

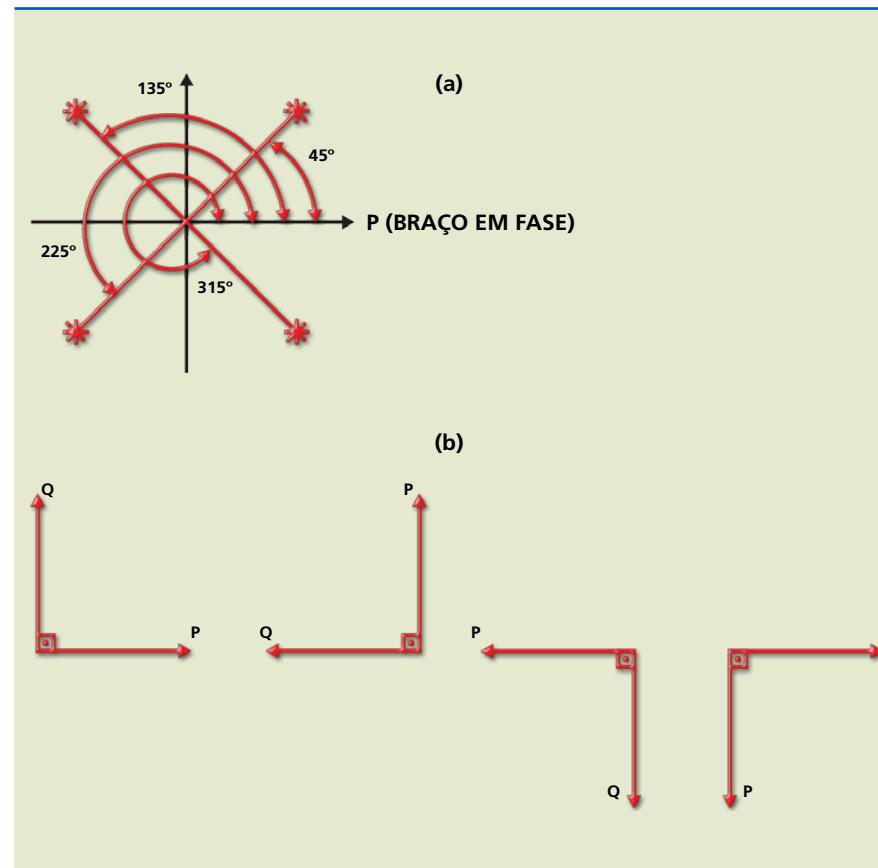
É importante observar que o *lock* do PLL é alcançado para qualquer uma das N posições de fase. Esse fato caracteriza a chamada ambiguidade de fase do circuito de recuperação da portadora.

Considerando as análises feitas, podemos concluir que o circuito de comparação de fase, o qual gera a tensão de referência, é a chave de todo o processo de recuperação da portadora.

4.4.8 Codificação/decodificação diferencial

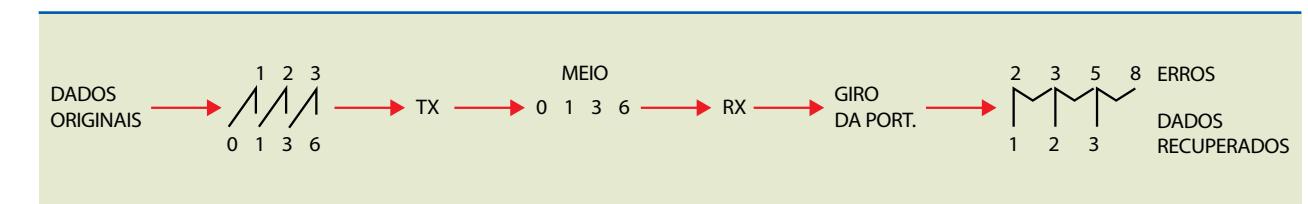
O circuito de recuperação da portadora não consegue garantir que a fase da portadora recuperada seja exatamente a fase da portadora utilizada na transmissão. No entanto, sabemos que esse circuito garante que a fase recuperada seja uma das N fases possíveis que gerariam as mesmas fases de saída do modulador. Por exemplo, para o sistema 4 PSK, os conjuntos de portadoras que geram a constelação mostrada na figura 4.40a podem ser vistos na figura 4.40b.

Figura 4.40
Sistema 4 PSK:
(a) constelação e
(b) conjuntos de
portadoras que geram
a constelação.



Nesse caso, como não se sabe ao certo na recepção qual foi a fase utilizada na transmissão, usa-se o processo de codificação/decodificação diferencial, que consiste em somar os dados na transmissão e enviá-los ao modulador digital e na recepção, após a demodulação, subtrair os dados, obtendo os dados originais. Esse processo garante que os erros no sinal decorrentes da escolha de outro conjunto de portadoras sejam eliminados.

A figura 4.41 exemplifica o princípio da codificação/decodificação diferencial.



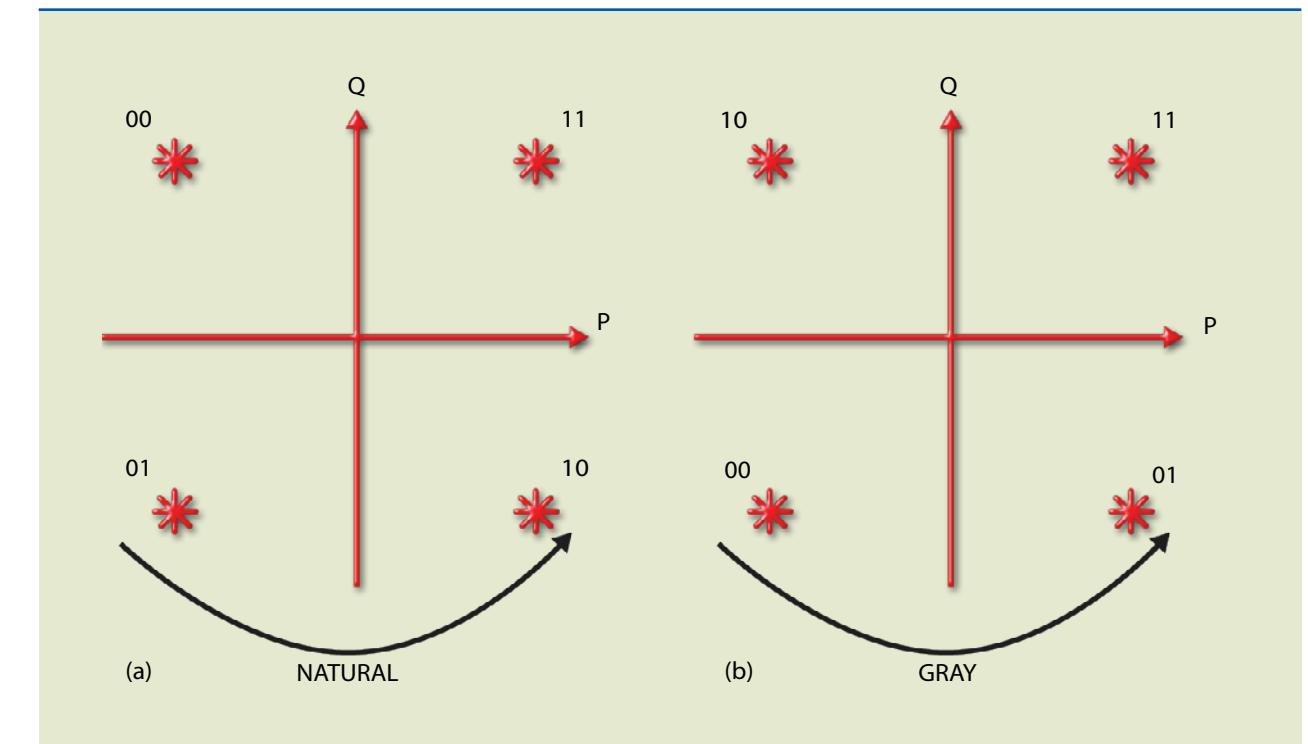
Os dados originais (1 2 3) são somados com os resultados anteriores, gerando os dados a serem transmitidos (0 1 3 6). Cabe ressaltar que o resultado é totalmente diferente do original. Esse sinal (0 1 3 6) é transmitido e, em razão da escolha de outro conjunto de portadoras, adiciona-se um erro (2) em todos os dados, originando o sinal (2 3 5 8) na saída do demodulador. Ao realizar a subtração entre os dados da saída do demodulador, os erros são cancelados, restando apenas os dados originais recuperados (1 2 3).

O processo de codificação/decodificação diferencial é simples. Um detalhe a ser levado em conta é que o modulador 4 PSK tem dois tipos de constelação, em que cada díbit (1 bit dos dados 1 e outro dos dados 2) forma o símbolo que será adicionado ao resultado da última soma.

Outro detalhe é que os moduladores 4 PSK vistos anteriormente trabalham com uma codificação para a constelação distinta da codificação natural utilizada com mais frequência. A codificação usada para a constelação 4 PSK é chamada de Gray e tem melhor desempenho quanto a erro do que a natural. A figura 4.42 mostra a representação dos dois tipos de constelação.

Figura 4.41
Princípio da codificação/
decodificação diferencial.

Figura 4.42
Codificações utilizadas
no modulador 4 PSK:
(a) natural e (b) Gray.



A variação dos díbits das duas codificações é apresentada na tabela 4.1.

Tabela 4.1

Codificações natural e Gray.

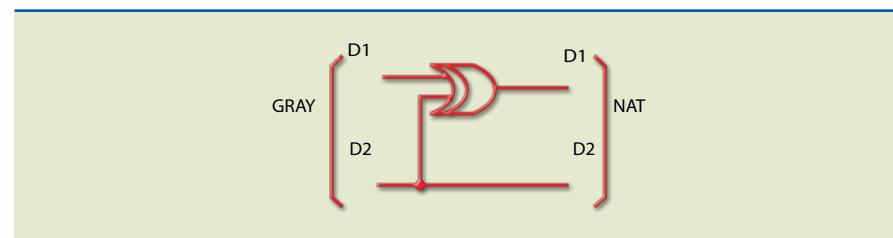
CODIFICAÇÃO NATURAL		CODIFICAÇÃO GRAY	
DADOS 2	DADOS 1	DADOS 2	DADOS 1
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	1
1	1	1	0

Para a codificação Gray, se tivermos a variação de 1 díbit para o outro, apenas 1 bit muda, o que não acontece para a codificação natural, fazendo com que nela o desempenho de erro seja pior.

Feita essa análise, devemos então considerar que os dados que chegam ao modulador estão codificados em Gray. Como os circuitos digitais que realizam a codificação/decodificação diferencial trabalham em codificação natural, uma das etapas desse processo é fazer conversões de natural → Gray e Gray → natural. A conversão Gray/natural é realizada pelo circuito apresentado na figura 4.43.

Figura 4.43

Conversor Gray/natural.



Nesse circuito, para $D_2 D_1 = 00$, $D_2 D_1 = 00$ na saída; para $D_2 D_1 = 01$ na entrada, $D_2 D_1 = 01$ na saída; para $D_2 D_1 = 11$ na entrada, $D_2 D_1 = 10$ na saída; e para $D_2 D_1 = 10$ na entrada, $D_2 D_1 = 11$ na saída.

A conversão natural/Gray tem o mesmo circuito que a conversão Gray/natural e segue a mesma relação, mas em sentido oposto.

4.4.9 Desempenho quanto a erro (TEB)

Da maneira como foi explicada a teoria sobre modulação/demodulação em rádio digital, podemos perceber que em condições ideais (sem introdução de ruído) o sinal que for transmitido será, na saída do demodulador, recuperado sem a mínima mudança em sua característica. A mesma afirmação é válida quando se adicionar ruído até o ponto em que não houver erro de bits na transmissão. Se isso acontecer, na saída do demodulador será obtido o mesmo sinal (idêntico) que foi transmitido, fato que não ocorre em uma transmissão analógica. É essa característica a grande vantagem da transmissão digital sobre a analógica.

Se o ruído adicionado provocar erros de bits, a eliminação da influência do ruído não poderá ser efetuada por completo, afetando a qualidade de transmissão degradada, apesar de ainda ser melhor do que a transmissão analógica.

Portanto, a qualidade da transmissão de um sinal digital é usualmente avaliada de acordo com a taxa de erro de bit (TEB), que nada mais é do que o número de bits errados na transmissão, dentro de determinado número de bits enviados. Por exemplo, uma TEB de $5 \cdot 10^{-6}$ significa que há 5 bits errados dentro de 10^6 bits transmitidos. A TEB depende das várias atenuações impostas pela linha de transmissão.

O ruído introduzido no sinal pode ser representado por um círculo ao redor do ponto do sinal no diagrama de constelação; o sinal modulado, por um vetor em um diagrama fasorial; e o ruído aplicado no sinal, por um vetor que se soma ao vetor do sinal no diagrama fasorial, originando o círculo.

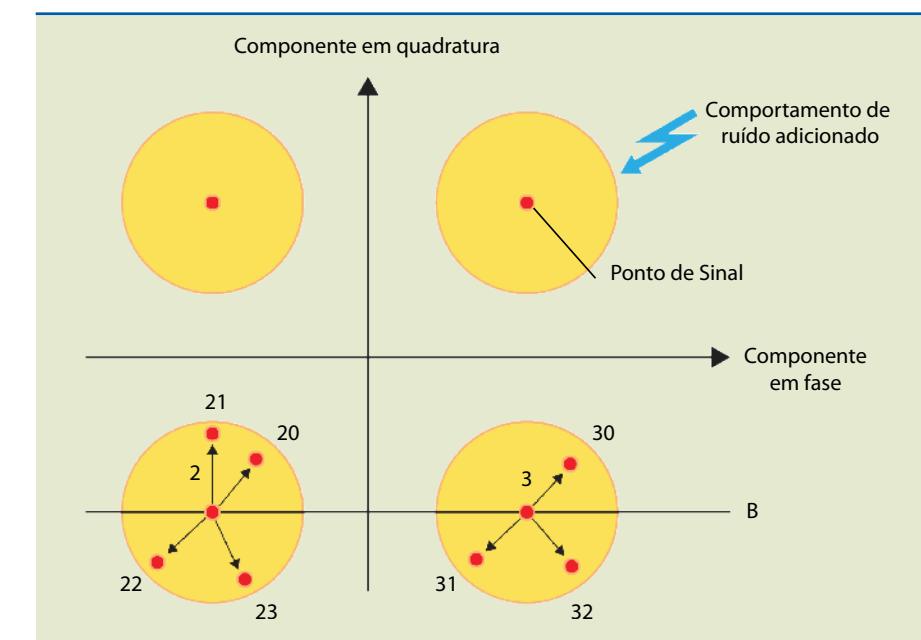
É por isso que, quando se realiza a análise da constelação do sinal modulado, a figura a ser obtida deve ter o menor círculo possível (o melhor caso é um ponto), pois, quanto maior for a largura desse círculo, mais ruído estará sendo introduzido ao sinal.

A figura 4.44 mostra a representação no diagrama fasorial de um sinal recebido do tipo 4 PSK. Sinais isentos de ruído térmico estão indicados pelos pontos 0, 1, 2 e 3, e o ruído adicionado a cada sinal, pelo círculo.

Quando, por exemplo, o sinal 2 é transmitido, ele é recebido nas posições 20, 21, 22 ou 23, em razão do distúrbio causado pelo ruído. Da mesma forma, quando o sinal 3 é transmitido, ele é recebido nos pontos 30, 31 ou 32. Consequentemente, se o sinal recebido é o 2 ou o 3, ele é determinado por uma linha paralela ao eixo horizontal, que interconecta esses pontos de sinal. Assim, a detecção do erro dos sinais ocorre quando, por causa do ruído, o sinal recebido salta para dentro do quadrante (raio do círculo > metade da distância entre os pontos 2 e 3).

Figura 4.44

Diagrama fasorial representando o sinal recebido com ruído térmico adicional para 4 PSK.



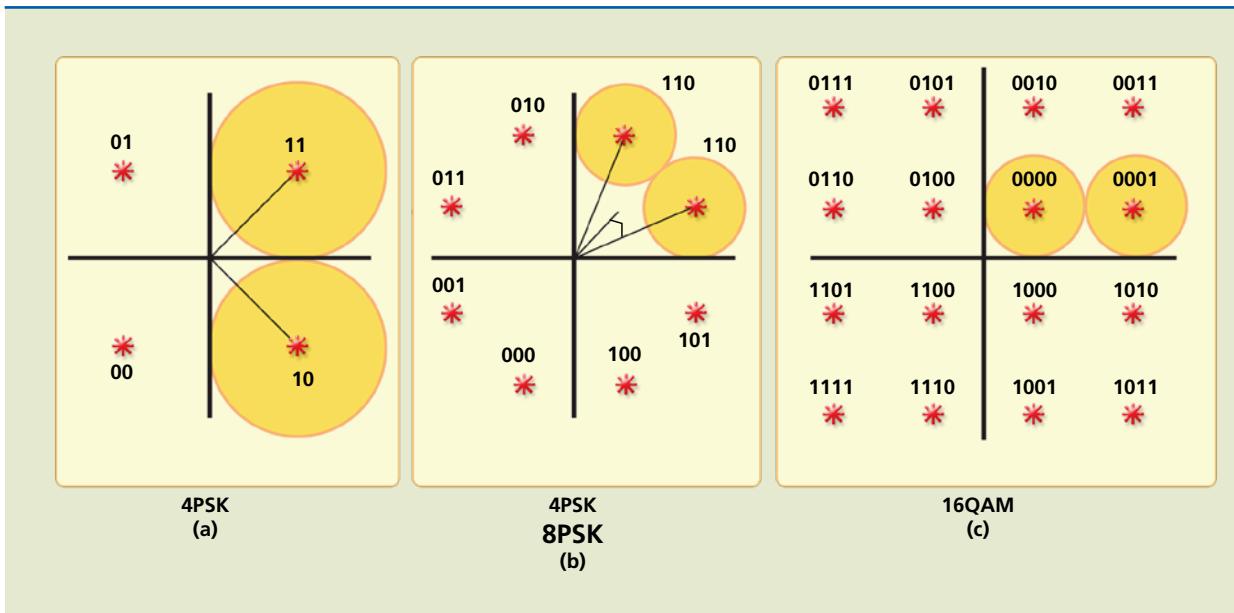
4.4.10 Erro na codificação Gray

O erro na transmissão digital se dá quando, por adição de ruído, um dos pontos é deslocado para outra posição da constelação. Esse deslocamento nada mais é do que uma alteração na fase ou na amplitude dos fasores pertencentes às modulações do tipo PSK ou QAM. O erro de um símbolo, ou melhor, o deslocamento de um fasor, corresponde ao erro dos bits representados por esse símbolo.

A figura 4.45 mostra a constelação para alguns tipos de modulação.

Figura 4.45

Constelações para:
 (a) 4 PSK,
 (b) 8 PSK e
 (c) 16 QAM.



Note que estão representados os círculos de indecisão que delimitam o campo de variação para o ruído introduzido na transmissão. Haverá erro de símbolo se as áreas delimitadas forem ultrapassadas.

O erro de símbolo, no entanto, corresponde ao erro de bits. Pela lógica, como há maior probabilidade de ocorrer erros entre símbolos adjacentes, é mais interessante que os moduladores/demoduladores sejam projetados de tal maneira que os símbolos adjacentes tenham diferença de apenas 1 bit entre si. Essa variação de apenas 1 bit de uma palavra binária (aqui representada pelo símbolo) é conhecida, como já vimos, por codificação GRAY e é a mais usada em qualquer tipo de modulador/demodulador digital.

A seguir, um resumo dos cálculos para obter a relação portadora/ruído (C/N).

$$P_s = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_0}}\right) \text{ para 2 PSK}$$

$$P_s = \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{4N_0}}\right) \text{ para 4 PSK}$$

$$P_s = \frac{3}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{20N_0}}\right) \text{ para 16 QAM}$$

$$P_s = \frac{7}{4} \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{84N_0}}\right) \text{ para 64 QAM}$$

$$P_b = \frac{1}{\log_2 M} \cdot P_s$$

$$\frac{C}{N} = \frac{E_b}{N_0} \cdot \log_2 M$$

em que:

- P_s é a probabilidade de erro de símbolo;
- erfc , a *error function* (função de erro);
- P_b , a probabilidade de erro de bit;
- E_b/N_0 , a energia de bit/ruído no bit.

4.4.11 Dados para comparação entre sistemas de modulação

A escolha da técnica de modulação digital é influenciada pelo desempenho quanto a erro, características espetrais, complexidade de implementação e outros fatores peculiares à aplicação específica, como rádios digitais.

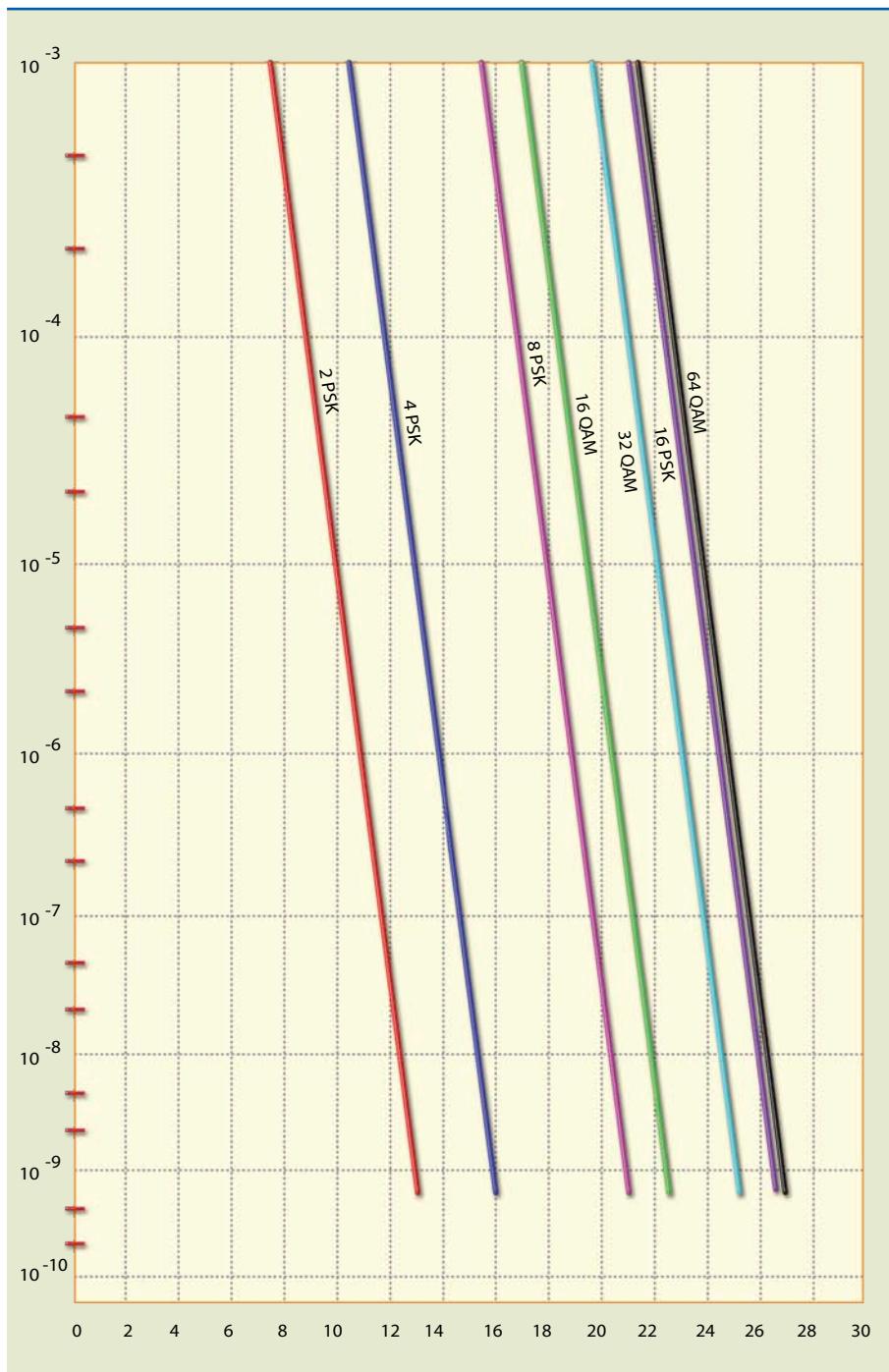
Pela análise aqui desenvolvida, observamos que os esquemas de modulação binários proporcionam bom desempenho quanto a erro e são de simples implementação, mas faltam a eles a eficiência de banda requerida para a maioria das aplicações práticas. Dessa maneira, em nosso estudo procuramos nos aprofundar em técnicas que apresentassem boa eficiência de banda.

Analizando o gráfico da taxa de erro de bit em função da relação C/N (figura 4.46), podemos concluir que, quanto maior for o nível de modulação, mais crítica se tornará a demodulação em relação ao ruído; no entanto, também ocorrerá maior eficiência de banda com o aumento do nível de modulação. Quando compararmos o 32 QAM com o 16 PSK, percebemos que essa consideração não é válida quanto a erro, pois os pontos da modulação 32 QAM não são bem posicionados (não estão mais longe uns dos outros) como os da modulação 16 PSK.

Na prática, para obter essas curvas, mede-se a TEB por potência recebida, o que levará ao mesmo formato e à mesma conclusão. As curvas da figura 4.46 são utilizadas apenas para efeito de comparação dos vários sistemas e/ou para o cálculo de sistemas.

Figura 4.46

Desempenho de TEB em função da relação C/N para esquemas típicos de modulação.



Capítulo 5

Radiopropagação

As ondas de rádio são formadas pela interação de um campo magnético e um campo elétrico, originando uma onda eletromagnética irradiada por uma antena. Essa onda é gerada por uma corrente de radiofrequência proveniente de um transmissor, em uma frequência de operação do sistema de comunicação.

A propagação das ondas de rádio pelo espaço livre, chamada radiopropagação, é a maneira como elas percorrem o caminho entre o transmissor e o receptor e se dá de tal modo que a direção de propagação do vetor campo elétrico é sempre perpendicular à do campo magnético.

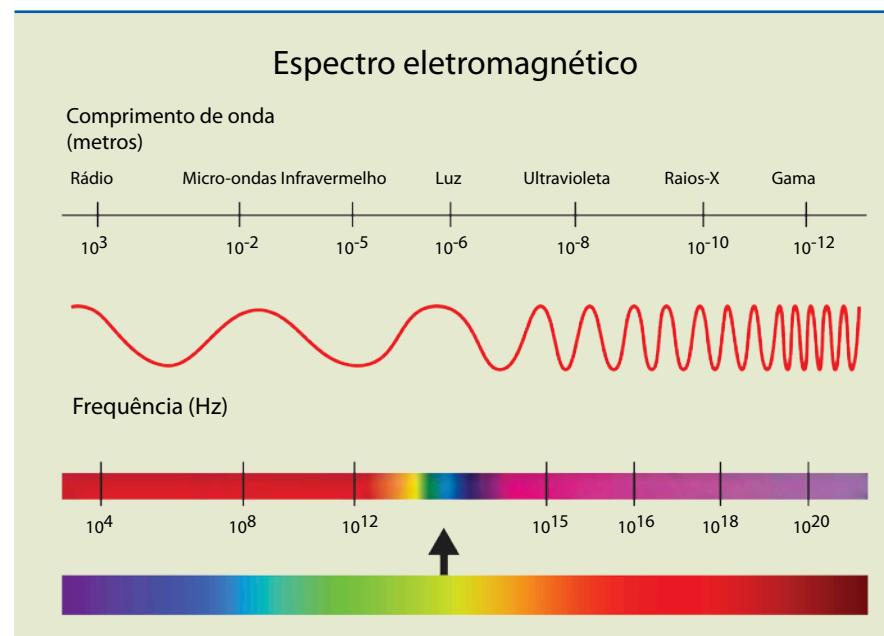
Durante o percurso, as ondas de rádio podem sofrer reflexão, difração ou refração, dependendo de fatores como tipo de enlace, frequência de operação e distância percorrida. Os efeitos desses fenômenos resultam em perda de energia e de atenuação.

5.1 Espectro de frequências

Cada sistema de comunicação opera dentro de uma faixa de frequências predefinida, a qual está incluída no espectro de frequências que engloba todas as faixas de irradiação eletromagnética, entre elas as faixas utilizadas em comunicações via rádio, as frequências de infravermelho, a faixa de luz visível, os raios ultravioleta, os raios X e a radiação gama. Essas divisões do espectro são apresentadas na figura 5.1.

Figura 5.1

Espectro eletromagnético de frequências.



A tabela 5.1 mostra a parte do espectro de frequências destinado às comunicações via rádio, dividida em faixas.

faixa de	até	serviço	observação
20 Hz	20 000 Hz	Sons audíveis	
20 kHz	30 kHz	Ultrassom	
530 kHz	1 600 kHz	Rádio AM	107 emissoras com 10 kHz de banda
34,48 MHz	34,82 MHz	Radiotáxi	
38 MHz	40,6 MHz	Telemedicina biomédica	
40,6 MHz	40,7 MHz	Telemedicina de características de materiais	
40,7 MHz	41,0 MHz	Telemedicina biomédica	
41,0 MHz	49,6 MHz	Diversos serviços	
49,6 MHz	49,9 MHz	Telefonia sem fio	
49,9 MHz	54 MHz	Diversos serviços	
54 MHz	60 MHz	Televisão VHF	Canal 2
60 MHz	66 MHz	Televisão VHF	Canal 3
66 MHz	70 MHz	Televisão VHF	Canal 4
70 MHz	72 MHz	Radioastronomia	
72 MHz	73 MHz	Telecomando	
73 MHz	75,4 MHz	Radionavegação para aeronáutica	
75,4 MHz	76 MHz	Telecomando	
76 MHz	82 MHz	Televisão VHF	Canal 5
82 MHz	88 MHz	Televisão VHF	Canal 6
88 MHz	108 MHz	Radiodifusão rádio FM	99 canais em faixas de 200 kHz
88 MHz	108 MHz	Microfone sem fio de alcance restrito	
108 MHz	117,975 MHz	Radionavegação para aeronáutica	
117,975 MHz	121,5 MHz	Comunicação móvel para aeronáutica	

Tabela 5.1
Espectro de frequências e alguns dos serviços atribuídos

faixa de	até	serviço	observação
121,5 MHz	121,5 MHz	Comunicação de socorro	
121,5 MHz	136 MHz	Comunicação móvel para aeronáutica	
136 MHz	138 MHz	Satélites Meteorológicos Internacionais	
138 MHz	143,6 MHz	Comunicações fixas e móveis	
143,6 MHz	143,65 MHz	Pesquisas espaciais	
143,65 MHz	144 MHz	Radioamador	
144 MHz	146 MHz	Radioamador por satélite	
146 MHz	148 MHz	Radioamador	
148 MHz	149,17 MHz	Reservado ao Serviço Especial de Supervisão e Controle (Sesc)	
149,17 MHz	174 MHz	Diversos serviços	
174 MHz	180 MHz	Televisão VHF	Canal 7
180 MHz	186 MHz	Televisão VHF	Canal 8
186 MHz	192 MHz	Televisão VHF	Canal 9
192 MHz	198 MHz	Televisão VHF	Canal 10
198 MHz	204 MHz	Televisão VHF	Canal 11
204 MHz	210 MHz	Televisão VHF	Canal 12
210 MHz	216 MHz	Televisão VHF	Canal 13
216 MHz	470 MHz	Diversos Serviços	
470 MHz	476 MHz	Televisão UHF	Canal 14
476 MHz	482 MHz	Televisão UHF	Canal 15
482 MHz	806 MHz	Televisão UHF	Canais 16 a 69
806 MHz	824 MHz	Diversos serviços	
824 MHz	834,4 MHz	Telefonia celular banda "A"	
834,4 MHz	845 MHz	Telefonia celular banda "B"	

faixa de	até	serviço	observação
845 MHz	869 MHz	Diversos serviços	
869 MHz	880 MHz	Telefonia celular banda "A"	
880 MHz	880,6 MHz	Outros serviços	
880,6 MHz	890 MHz	Telefonia celular banda "B"	
890 MHz	891,5 MHz	Telefonia celular banda "A"	
891,5 MHz	894 MHz	Telefonia celular banda "B"	
894 MHz	896 MHz	Telefonia celular aeronáutico	
896 MHz	3 000 MHz	Outros serviços	
3 GHz	3,1 GHz	Radionavegação e radiolocalização	
3,7 GHz	4,2 GHz	Descida de sinal de satélite banda "C"	
5,925 GHz	6,425 GHz	Subida de sinal de satélite banda "C"	
6,425 GHz	7,125 GHz	Sistema digital	
10,7 GHz	11,7 GHz	Rádio digital	
10,7 GHz	12,2 GHz	Descida de sinal de satélite banda "Ku"	
13,75 GHz	14,8 GHz	Subida de sinal de satélite banda "Ku"	
14,5 GHz	15,35 GHz	Rádio digital	

As faixas de frequências em que se concentram os principais serviços de telecomunicações são:

- VHF (very high frequency ou frequência muito alta)** – Faixa entre 30 MHz e 300 MHz, na qual estão os serviços de radiodifusão comercial FM e os canais 2 a 13 de TV.
- UHF (ultra high frequency ou frequência ultra-alta)** – Faixa entre 300 MHz e 3 GHz, com destaque para os canais de TV transmitidos por UHF e de telefonia celular.
- SHF (super high frequency ou frequência superalta)** – Faixa entre 3 GHz e 30 GHz, destinada às transmissões via satélite nas bandas "C" (TV aberta, telefonia e dados) e "Ku" (TV por assinatura), além de frequências para rádio digital.

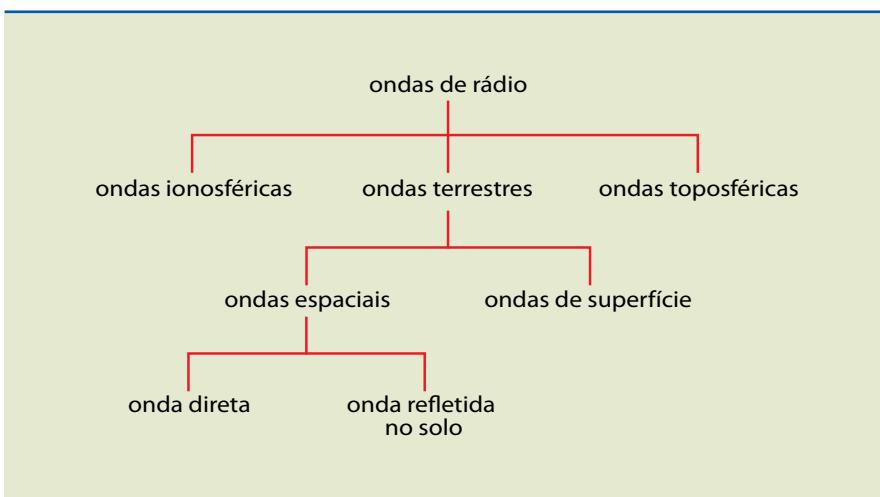
5.2 Modos de propagação

As ondas de rádio podem se propagar no espaço de diferentes modos, dependendo de sua faixa de frequências de operação (figura 5.2). Basicamente, há três modos:

- Propagação por onda terrestre** – As ondas de rádio se propagam próximo à superfície da Terra, possibilitando comunicações além do horizonte, para transmissões nas faixas de LF e MF.
- Propagação por onda celeste** – Conhecida também como propagação ionosférica. As ondas de rádio sofrem refrações na ionosfera e retornam à Terra, favorecendo as comunicações a longa distância. As transmissões em HF (ondas curtas) propagam-se desse modo.
- Propagação por visibilidade** – As antenas transmissora e receptora estão visíveis entre si, com alta direvidade, ou seja, o feixe se propaga praticamente em linha reta. Os obstáculos entre as antenas de transmissão e recepção podem interromper a comunicação. As transmissões de rádio nas faixas de VHF e UHF (FM, TV VHF e TV UHF) propagam-se por visibilidade (ou linha de visada).

Figura 5.2

Modos de propagação das ondas.



5.3 Características da atmosfera e superfície terrestres

Para ampliar o entendimento da radiopropagação, é necessário conhecer a composição das camadas da atmosfera terrestre e os fatores que a afetam, além das características de relevo e condutividade da região na qual se deseja implantar um enlace.

A atmosfera terrestre é dividida em cinco camadas, de acordo com a altitude, densidade, concentração de gases e ionização: troposfera, estratosfera, mesosfera, ionosfera e exosfera. Aqui nos interessa as quatro primeiras (figura 5.3).

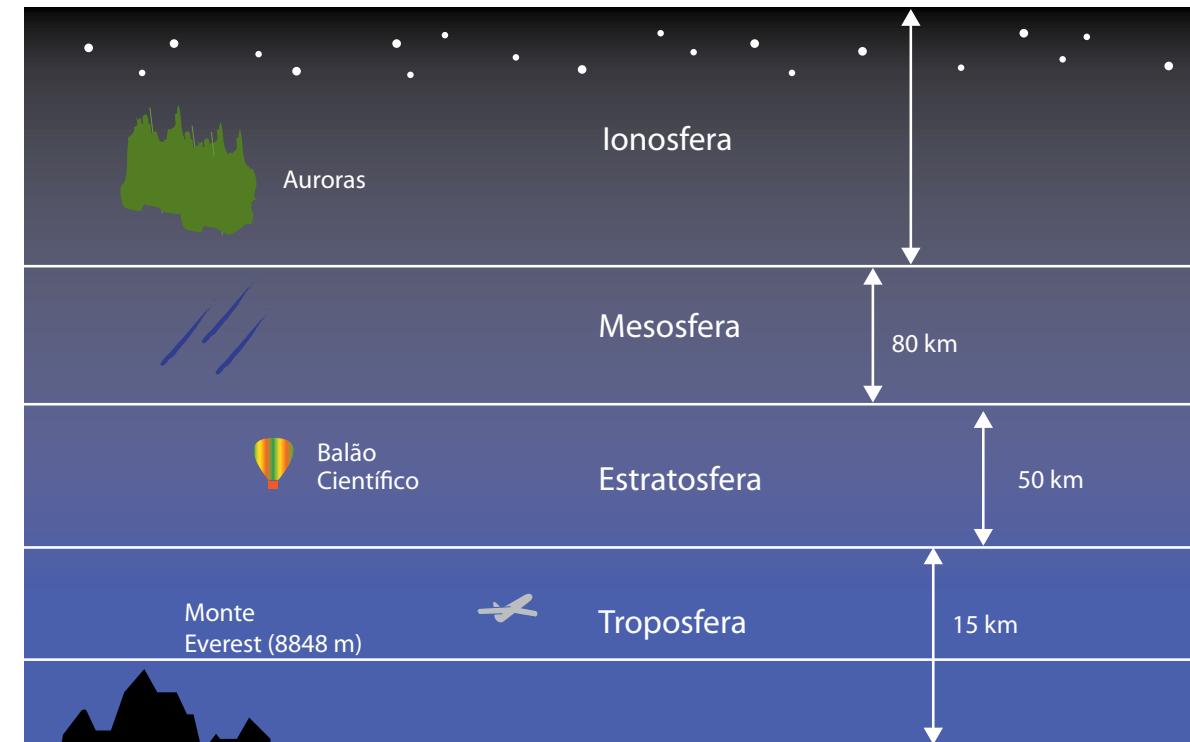


Figura 5.3

Quatro camadas da atmosfera terrestre.

A **troposfera** é a camada mais baixa, estendendo-se do solo até cerca de 15 km de altitude. Com alta concentração de gases, nela ocorrem praticamente todos os fenômenos climáticos (chuva, neve etc.) do planeta. Por causa desses fenômenos, a propagação de ondas se dá por meio de atenuações. Na troposfera observam-se turbulências decorrentes do aquecimento desigual da superfície, o que influencia a eficiência em sistemas de comunicação que utilizam essa camada. Um bom exemplo são as inversões térmicas, que criam dutos troposféricos, prejudicando a propagação a longas distâncias.

A **estratosfera** é uma região isotérmica, ou seja, apresenta temperatura praticamente constante; portanto, não está sujeita a inversões térmicas e, por consequência, não há refrações significativas. Na propagação das ondas de rádio, é considerada uma camada inerte.

A **ionosfera** é uma região de constituição não homogênea e de grande ionização, devido à baixa concentração de gases e da intensa radiação. O grau de ionização varia no decorrer do dia, sendo menos intenso no período noturno, por causa da ausência de radiação solar, o que permite maior recombinação de partículas. A ionosfera é dividida em três camadas – D, E e F –, de acordo com a altitude em relação à superfície terrestre.

A **camada D** ocupa uma faixa entre 50 e 90 km de altitude em relação à superfície terrestre e apresenta fraca densidade de ionização. Ela se forma durante algumas horas do dia e inexiste à noite, pois depende da posição do Sol. A refração das ondas acontece apenas nas faixas de VLF e HF.

A **camada E** está situada entre 100 km e 140 km de altitude, com maior ionização, porém de volume irregular. Chamada de esporádica E, pode se formar a qualquer instante, com duração e dimensão imprevisíveis. Aparece também no período noturno, alterando o percurso das ondas transmitidas, que seriam refratadas a uma altura inferior. Nessa camada são feitas comunicações em HF a longas distâncias (até 2000 km) durante o dia e em MF durante a noite, atingindo no máximo 200 km.

A **camada F** é dividida em duas subcamadas: F1, de 180 km a 240 km, que existe somente durante o dia, e F2, de 240 km a 400 km, que é a principal camada para reflexões a longa distância.

A ionosfera apresenta variações de comportamento a intervalos de tempo determinados:

- **Variações ao longo do dia** – Ocorrem porque a ionização varia de acordo com a posição do Sol, aumentando progressivamente pela manhã até alcançar grau máximo no início da tarde e diminuir substancialmente à noite, devido à ausência de atividade solar.
- **Variações sazonais** – Provocam alterações nas frequências máximas de operação, em função das estações do ano. Essa é uma das razões pelas quais ocorre o câmbio de frequências pelas emissoras de ondas curtas pelo menos duas vezes por ano, próximo aos equinócios da primavera e do outono.
- **Variações causadas pelo ciclo solar** – A atividade solar obedece a um ciclo que se renova cada 11 anos, aproximadamente, chamado ciclo solar. Esse ciclo pode ser observado pela atividade solar, mas precisamente pela atividade das manchas solares (regiões de temperaturas relativamente baixas localizadas na superfície do Sol). Quando o número de manchas solares é elevado, a ionosfera apresenta maior densidade de elétrons; consequentemente, a propagação melhora para as frequências mais altas.
- **Variações em função da latitude** – Um exemplo é a região dos polos terrestres, que têm baixa ionização por causa da pouca incidência de radiação solar.

5.4 A superfície terrestre

Sabemos que a Terra tem formato próximo ao de uma esfera, com ligeiro achatamento nos polos, e que três quartos de sua superfície são ocupados por água e um quarto por terra. Tanto o solo como a água são capazes de conduzir as ondas de rádio.

Cada tipo de solo, o mar, os rios e os lagos possuem diferentes características de condutividade das ondas. Enquanto as florestas absorvem as ondas de maneira considerável, a água do mar, devido à salinidade, favorece a radiopropagação de superfície.

A tabela 5.2 apresenta alguns valores típicos de condutividade, cuja unidade de medida é o siemens (S), de acordo com o tipo de superfície.

Tipo de superfície	Condutividade, em mS/m
Água salgada	5 000
Água doce	1
Solo úmido	20
Solo médio	10
Solo seco ou arenoso	1

Tabela 5.2
Condutividade da superfície terrestre.

O tipo de solo e sua condutividade são fatores fundamentais em propagação por onda terrestre. Quanto menor a frequência, maior será a profundidade de penetração da onda no solo e, quanto mais condutivo o solo, maior alcance terá a comunicação.

5.5 Tipos de ondas transmitidas

Basicamente, há dois tipos de ondas eletromagnéticas transmitidas: onda terrestre e onda celeste (figura 5.4).

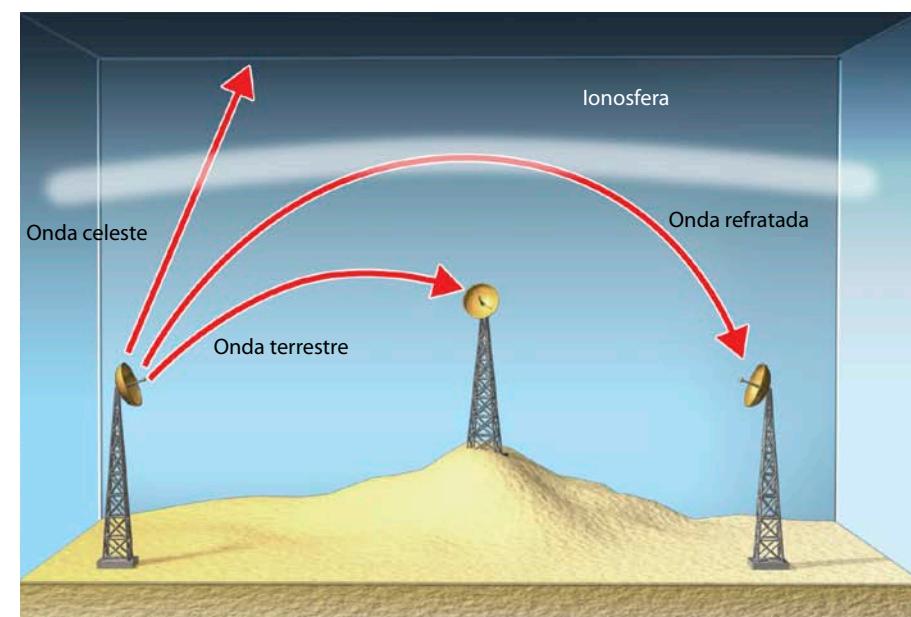


Figura 5.4
Tipos de transmissão de ondas de rádio.

5.5.1 Onda terrestre

A onda terrestre ou superficial é uma onda cujo modo de propagação depende das características de condutividade do solo e do relevo de uma região. Dependendo da condutividade dos meios que encontra em seu percurso, uma

porção da energia da onda superficial é absorvida pelo solo. O grau de absorção varia de maneira inversamente proporcional à condutividade da superfície: quanto maior a condutividade, menor a absorção e maior o ângulo de inclinação (o ângulo entre a superfície e o plano de transmissão), resultando em maior alcance da onda superficial. Por exemplo, transmissões sobre água salgada têm alcance consideravelmente maior que transmissões sobre o solo.

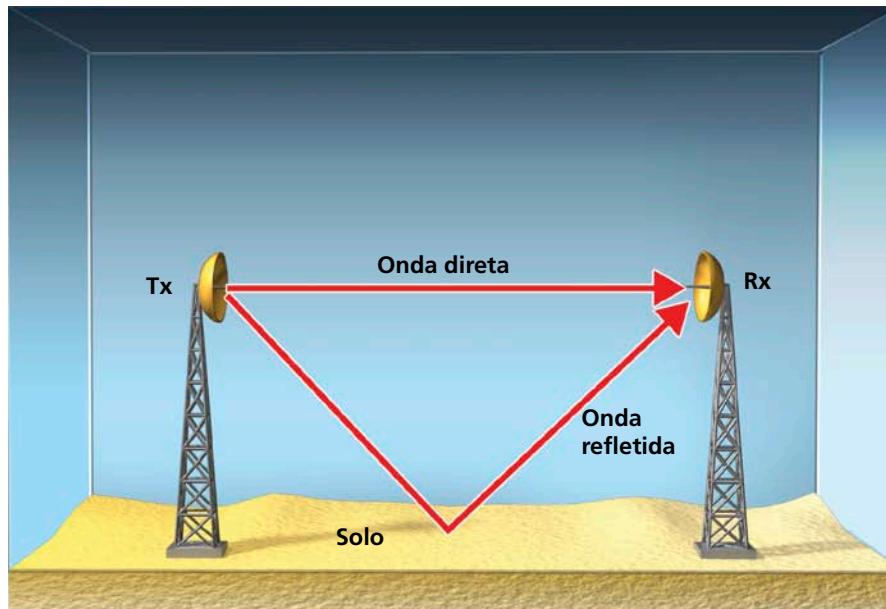
A propagação por onda terrestre pode apresentar dois tipos de ondas: onda direta e onda refletida (figura 5.5).

A onda direta se propaga quase em linha reta entre o transmissor e o receptor. Na verdade, é ligeiramente inclinada em direção à superfície, devido à refração na troposfera, com distância de transmissão indo além do horizonte visual. É também chamada de **onda troposférica**.

A onda refletida é a porção da onda terrestre que se reflete na superfície. A intensidade com que ela é refletida depende do coeficiente de reflexão da superfície contra a qual se choca e do ângulo de incidência. Embora esse ângulo e o ângulo de reflexão sejam iguais, há defasagem de 180° na fase das ondas incidente e refletida. Esse tipo de onda é considerado indesejável em certos casos, podendo provocar o cancelamento completo da onda na antena receptora, caso esta receba simultaneamente as ondas direta e refletida com a mesma amplitude. Contudo, em geral o cancelamento é parcial, pois, além de a defasagem não ser exatamente de 180° , pelo fato de a onda refletida demorar mais tempo para chegar à antena receptora, a onda refletida pode apresentar menor intensidade causada pela absorção parcial da onda irradiada.

Figura 5.5

Propagação por ondas direta e refletida.



5.5.2 Onda celeste

A onda celeste se propaga na atmosfera por meio de refrações na ionosfera, retornando à superfície terrestre. Ao retornar, ela pode ser refletida na ionosfera, repetindo o processo e possibilitando transmissões a longas distâncias.

A ionosfera influui de maneira decisiva na propagação por onda celeste, pois pode agir como condutor, absorvendo parte da energia da onda transmitida, ou como espelho rádio, refratando a onda celeste na superfície. A capacidade da ionosfera de retornar uma onda de rádio depende de fatores como densidade de íons, ângulo de irradiação e frequência de transmissão. Em algumas situações, a onda nem mesmo é refratada, atravessando a ionosfera.

A distância entre a antena transmissora e o ponto de retorno à superfície depende do ângulo de irradiação, que é limitado pela frequência (quanto maior a frequência, mais difícil é a refração), apesar de resultar em maior alcance. Cada camada da ionosfera pode refratar ondas de rádio até uma frequência máxima, a MUF (*maximum usable frequency* – máxima frequência útil).

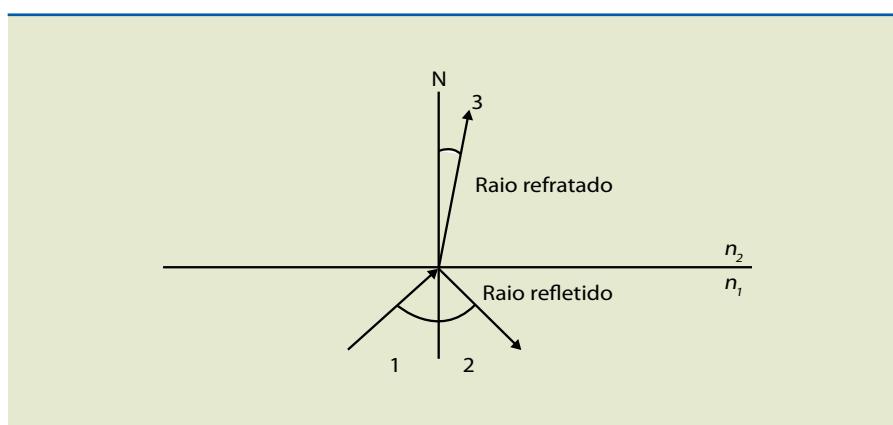
Dessa análise, pode-se concluir que existe uma frequência ótima, a OWF (*optimum work frequency* – frequência ótima de trabalho), que representa certo percentual da MUF. Além do estado da ionosfera, fatores como comprimento do circuito, ciclo solar e sazonalidade são usados para estabelecer a MUF para cada hora e camada da ionosfera ou para fazer uma predição de seu valor com base em observações efetuadas ao longo do tempo.

O ângulo de irradiação é outro fator importante. Acima de determinada frequência, as ondas transmitidas não são refratadas, pois seguem pelo espaço. Contudo, se o ângulo de irradiação for reduzido, parte das ondas de alta frequência retorna à superfície. O ângulo limite a partir do qual não ocorre reflexão da onda na ionosfera é chamado de ângulo crítico para determinada frequência.

Vamos analisar a seguinte situação: uma onda incidindo sobre uma superfície que separa dois meios, os quais têm, portanto, índices de refração diferentes, n_1 e n_2 (figura 5.6).

Figura 5.6

Onda incidindo sobre uma superfície que separa dois meios.



Na refração, temos:

$$n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_3 \quad (5.1)$$

em que:

$$n = \frac{\text{velocidade da luz no vácuo}}{\text{velocidade da luz no meio}}$$

Na reflexão, temos:

$$\theta_1 = \theta_2$$

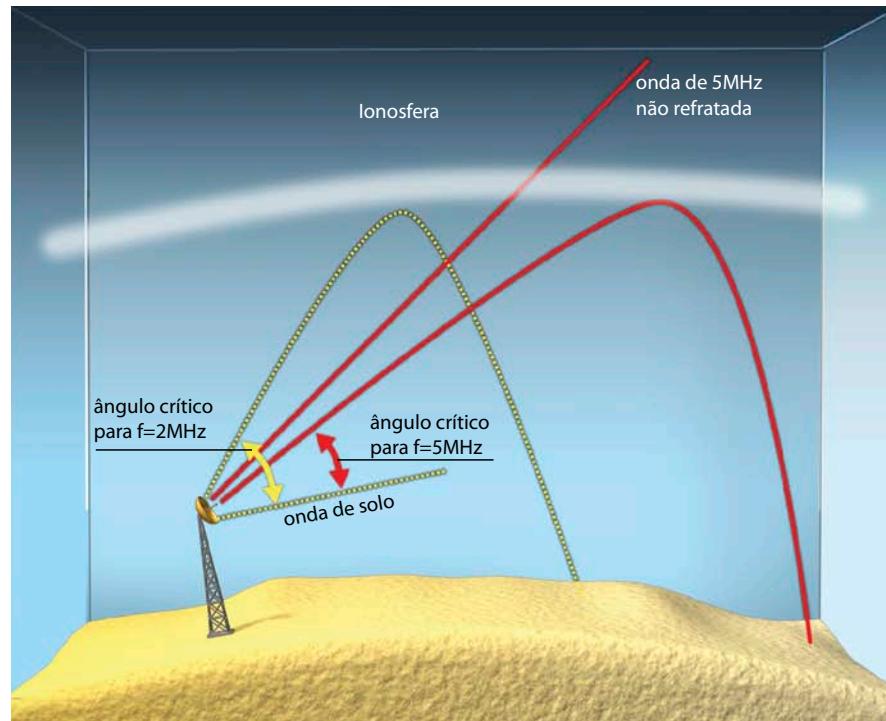
O ângulo de irradiação é determinado em função da frequência utilizada e da distância entre transmissor e receptor, de maneira aproximada (figura 5.7).

O caminho percorrido pela onda de rádio desde o transmissor até o retorno à superfície é denominado **salto**. Dependendo da distância até o receptor, a onda pode efetuar mais de um salto (a onda reflete na Terra e volta à ionosfera, onde é refratada, e assim por diante). Durante o percurso, ocorrem dois fenômenos:

- **Distância de salto** – Distância entre o transmissor e o retorno à superfície, ou distância entre os saltos efetuados.
- **Zona de silêncio** – Região na superfície terrestre que se estende desde o limite do alcance da onda superficial até o ponto de retorno. Nenhuma onda transmitida é recebida nessa zona.

Figura 5.7

Antena emitindo sinais com diferentes ângulos de irradiação.



As camadas que formam a ionosfera sofrem consideráveis variações em altitude, densidade e espessura, devido à variação na atividade solar. Durante os períodos de máxima atividade solar, a camada F é mais densa e se forma nas altitudes maiores, influenciando decisivamente a distância de salto e o alcance das ondas de rádio transmitidas. À noite, com a ausência de atividade solar, os sinais que seriam normalmente refratados pelas camadas D e E são refratados pela camada F, resultando em maior distância de salto.

O sinal transmitido não chega ao receptor com a mesma potência. A propagação das ondas de rádio impõe perdas ao sinal, existindo diversas causas para a degradação do sinal. As principais serão tratadas na próxima seção.

5.5.3 Fatores de degradação de sinais em radiopropagação

Desvanecimento refere-se a flutuações ou variações na intensidade de um sinal durante sua recepção. Esse fenômeno pode acontecer em todos os modos de propagação via rádio. Na propagação por onda terrestre, as duas frentes de onda – a direta e a oriunda de multipercuso – chegam defasadas ao receptor, causando, por vezes, o cancelamento do sinal. Em áreas onde prevalece a propagação por onda celeste, o desvanecimento pode decorrer de duas frentes de onda celeste que tenham percorrido percursos diferentes, chegando, portanto, defasadas ao receptor.

As variações na absorção e no comprimento do caminho da onda na ionosfera também podem provocar desvanecimento. Uma variação repentina na ionosfera causa a completa absorção de toda a irradiação da onda celeste. O desvanecimento se manifesta, ainda, quando o receptor se localiza perto da fronteira da zona de silêncio ou quando a frequência de operação está próxima ao valor da MUF. Nesses casos, pode ocorrer queda da intensidade do sinal recebido a níveis praticamente nulos.

Para tentar amenizar os efeitos do desvanecimento, aplica-se a técnica de diversidade, que consiste em utilizar mais de um receptor em regiões com desvanecimento profundo, combinando-os ou selecionando-os mutuamente para obter a melhor recepção possível. Esses receptores devem ter pouca correlação entre si em termos de qualidade de recepção, ou seja, não podem sofrer deterioração de qualidade ao mesmo tempo. Para implementar a técnica de diversidade, muitos são os recursos possíveis:

- Diversidade de espaço** – Recepção por diferentes antenas (em diferentes posições).
- Diversidade de frequência** – Diferentes frequências de RF, sempre com as mesmas informações de banda básica.

Diversas fontes de **ruído** afetam a recepção da onda de rádio. Elas podem ser naturais, quando o ruído é originado na natureza, ou artificiais, quando o ruído é gerado pelo ser humano.

No primeiro caso enquadram-se o ruído atmosférico, geralmente a maior causa de ruído na faixa de alta frequência, sendo maior nas regiões equatoriais, dimi-

nuindo com a latitude crescente, e o ruído cósmico, oriundo do espaço sideral, afetando mais as altas frequências.

Entre os ruídos provocados pelo ser humano encontram-se a ignição de motores de combustão, linhas de transmissão, lâmpadas fluorescentes, máquinas em geral e cabos elétricos. Como os ruídos artificiais atuam, em geral, verticalmente polarizados, a utilização de uma antena polarizada horizontalmente auxiliará na redução dos efeitos do ruído.

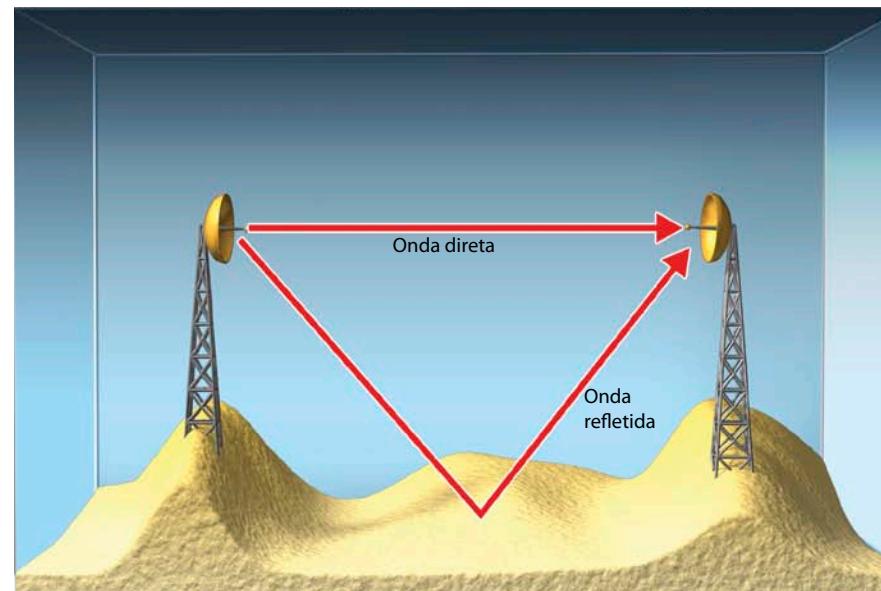
A camada D da ionosfera atenua as ondas que a atravessam. A capacidade de atenuação varia de acordo com o ciclo solar, sazonalmente e ao longo do dia, sendo maior no verão e ao meio-dia, conforme o grau de ionização da camada D.

As **condições climáticas** influenciam a propagação, determinando principalmente as distâncias dos percursos e atenuações. A chuva, por exemplo, provoca atenuação por absorção de energia, atuando como um dielétrico que dissipava a potência absorvida na forma de aquecimento ou espalhamento. Seu efeito é mais significativo para as frequências acima da faixa de VHF. O nevoeiro causa efeito parecido, sendo mais crítico em altas frequências, acima de 2 GHz.

5.6 Enlace em visibilidade

Um importante conceito de propagação é o de visibilidade. Para frequências acima de 300 MHz, o feixe de ondas passa a se propagar quase em linha reta. Essa situação requer que o posicionamento entre as antenas de transmissão e recepção seja frontal, ou seja, uma antena apontando diretamente para a outra. É o caso típico de propagação por onda terrestre, com o feixe direto e o refletido no solo ou por obstáculos no percurso (figura 5.8).

Figura 5.8
Visada direta entre duas antenas.



No projeto de enlaces em visibilidade, devemos levar em consideração dois efeitos que podem interferir em uma onda eletromagnética: difração e refração.

A **difração** permite que parte das ondas atinja antenas receptoras fora da linha de visada, quando o enlace é obstruído por obstáculos. O projeto é feito de tal maneira que permita a utilização de um obstáculo a fim de provocar desvio na direção de propagação da onda de rádio (figura 5.9).

A presença de obstáculos próximos à linha de visada entre as antenas acarreta diminuição da energia recebida, fazendo com que parte da onda seja bloqueada e parte contorne o obstáculo.

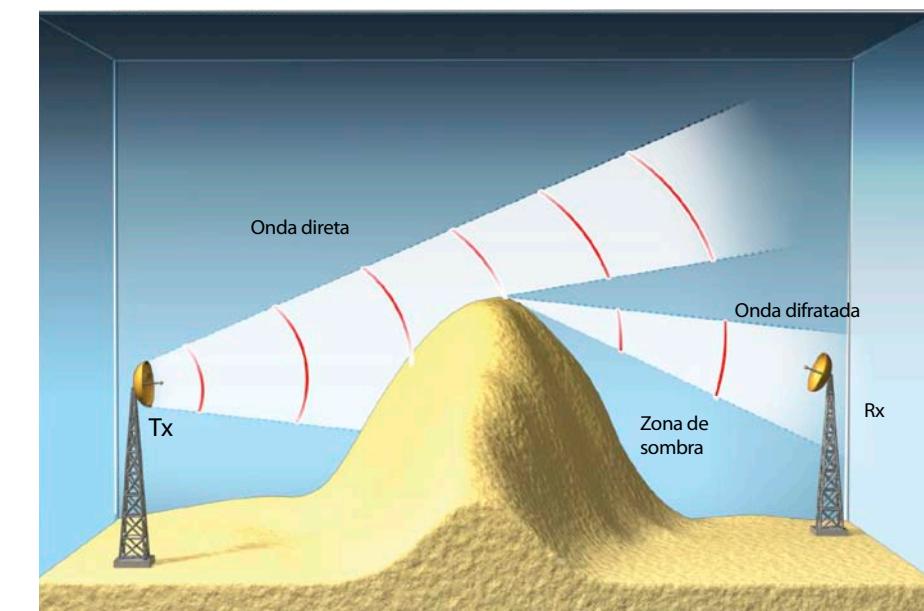


Figura 5.9
Difração de ondas de rádio com obstáculo.

A Terra pode se tornar um obstáculo a ser contornado, devido a sua curvatura. Esse fator deve ser levado em consideração principalmente nos enlaces por propagação de onda terrestre, de frequência bem mais baixa que a de micro-ondas. O efeito de difração causado pela curvatura da Terra é menos acentuado para altas frequências, sendo utilizado para enlaces de micro-ondas com visibilidade além do horizonte.

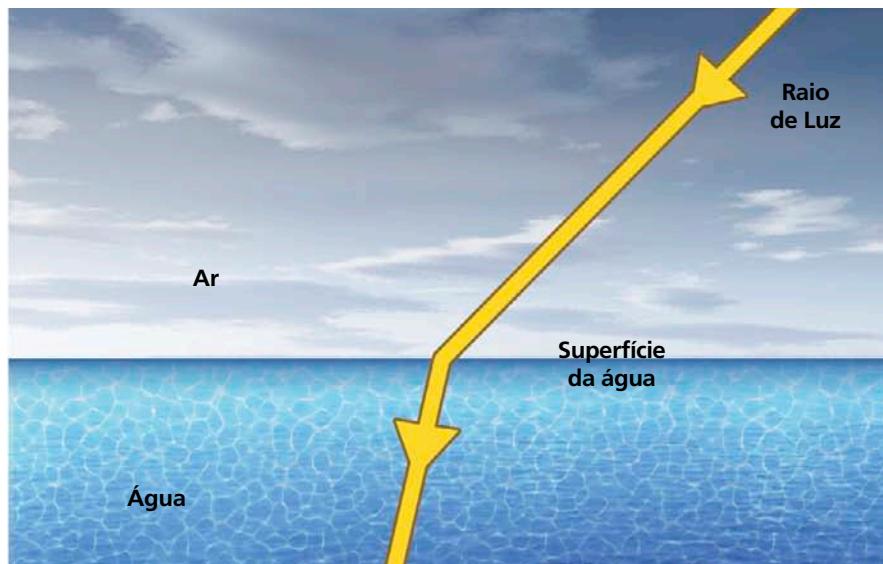
A **refração** é uma variação da direção de propagação de um feixe quando este atravessa a superfície de separação entre dois meios e tem sua velocidade de propagação alterada. É o caso, por exemplo, de um feixe de luz incidindo sobre a água. A relação entre a velocidade de propagação da onda em determinado meio e a velocidade de propagação no vácuo determina seu índice de refração (figura 5.10).

Em enlaces de micro-ondas, a trajetória da onda sofre encurvamento em relação ao solo. Esse encurvamento é causado pela passagem por diferentes camadas da atmosfera com índices de refração e densidade diferentes (figura 5.11).

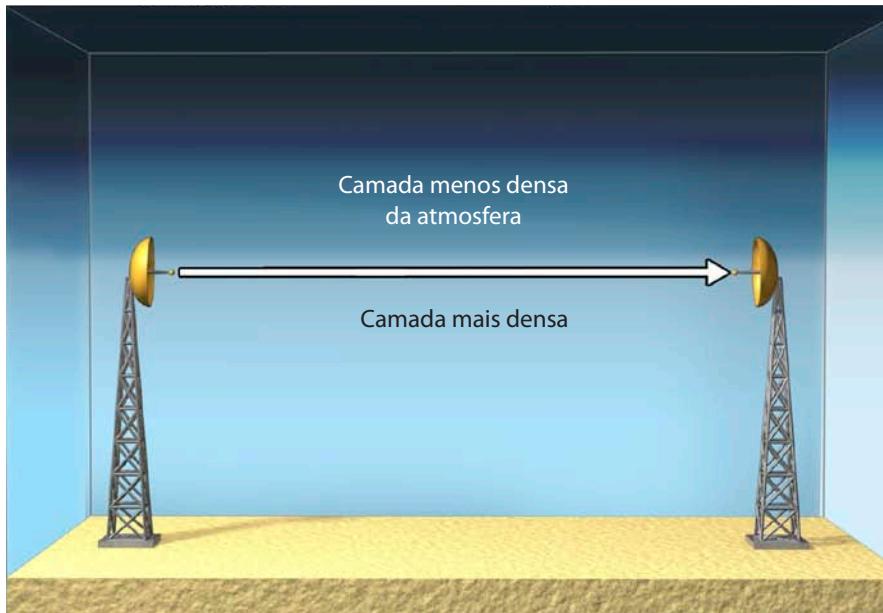


Figura 5.10

Refração da luz na água.

**Figura 5.11**

Encurvamento do feixe.

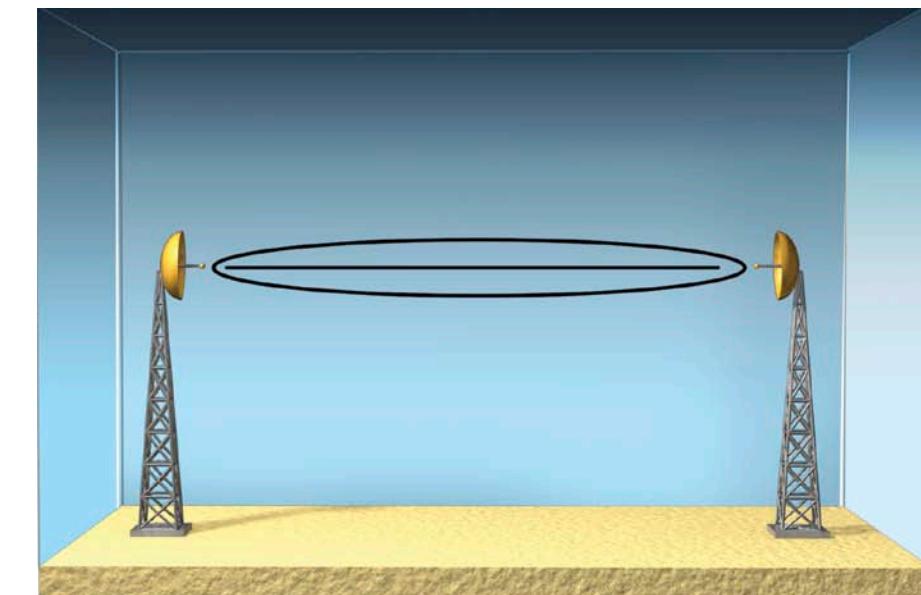


5.6.1 Zonas de Fresnel

A energia irradiada pela antena transmissora que se propaga pelo espaço livre é formada por um conjunto de ondas eletromagnéticas. Desse total de energia, apenas uma parcela chega à antena receptora. A perda durante o trajeto se deve ao fato de a energia ser irradiada dentro de um feixe que, por mais estreito que seja, não direciona toda a energia para a antena receptora, existindo irradiação em outras direções. Apesar de seguirem percursos diferentes, depois de sofrerem múltiplas refrações na atmosfera, vários sinais que partiram da antena transmissora também chegam à antena receptora. Assim, podemos considerar que esse conjunto de ondas forma uma elipse ligando as antenas de transmissão e de recepção, chamada **elipse de Fresnel** (figura 5.12).

Figura 5.12

Elipse de Fresnel.

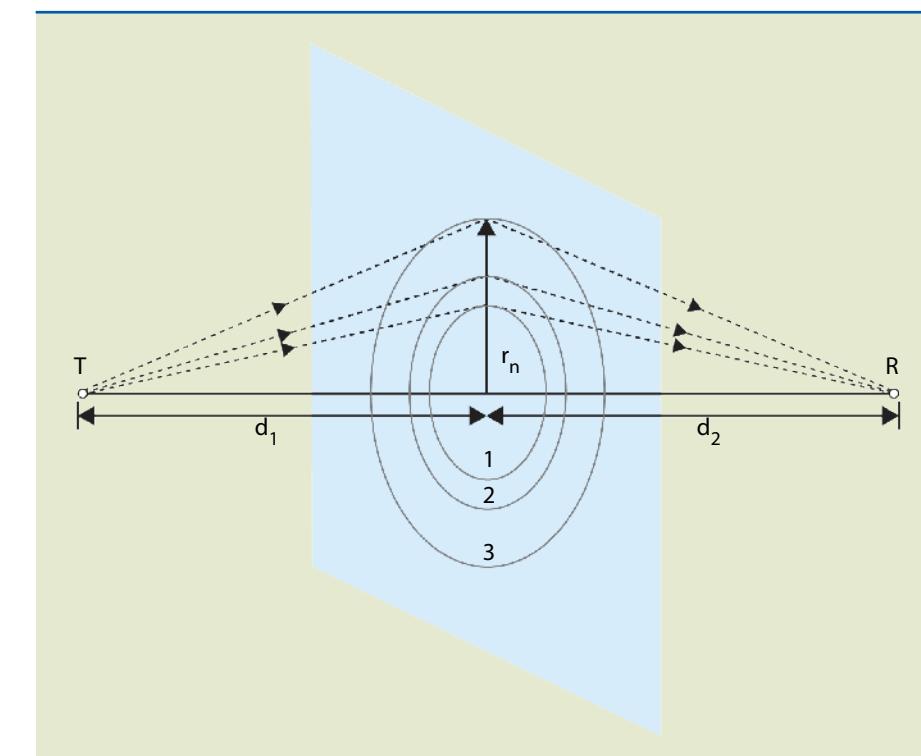


Essa elipse deve ser vista tridimensionalmente. Ela é formada por áreas de luz e sombra, na forma de anéis, denominadas **zonas de Fresnel**. Utilizando esses conceitos, podemos verificar a viabilidade de um enlace de comunicação entre dois pontos, com possíveis obstáculos capazes de causar degradação ou perda do sinal.

A figura 5.13 mostra o percurso entre as antenas transmissora e receptora com obstáculo.

Figura 5.13

Percurso entre as antenas de transmissão e recepção com obstáculo.



Os raios r_1 a r_n das zonas de Fresnel podem ser calculados pela expressão:

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{(d_1 + d_2)}} \quad (5.2)$$

em que:

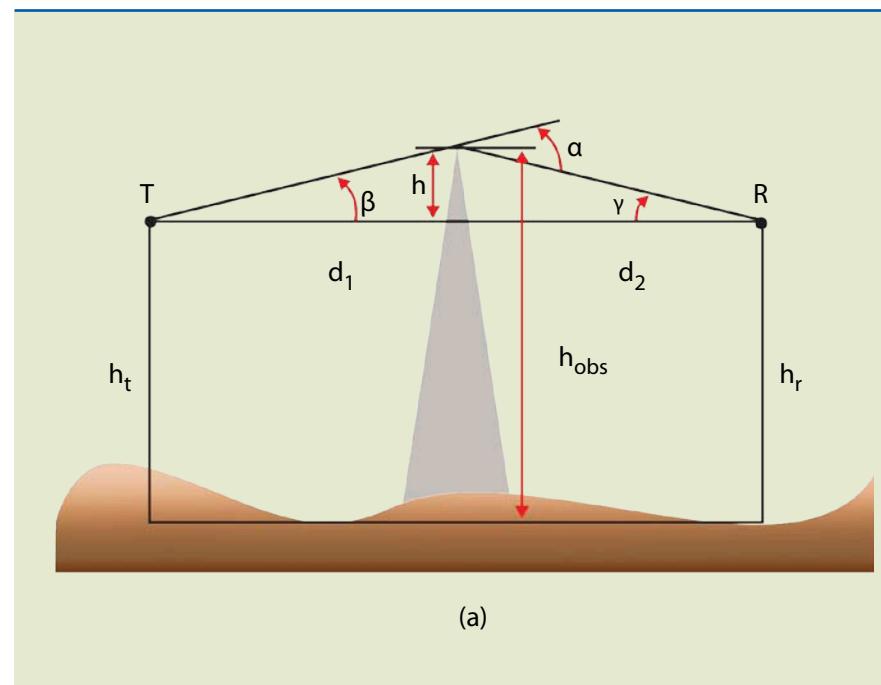
- n é um inteiro positivo (1, 2, 3 etc.);
- d_1 é a distância da antena transmissora ao obstáculo;
- d_2 , a distância do obstáculo à antena receptora.

A expressão é válida para d_1 e d_2 maiores que r_n .

A figura 5.14 apresenta um exemplo de *link* de rádio enlace em visibilidade com obstáculo, de altura h .

Figura 5.14

Rádio enlace em visibilidade com obstáculo.



Condições de projeto: $h_{obs} \ll d_1$ e d_2 e $h_{obs} \gg \lambda$,

Condição inicial de viabilidade do enlace: $h \leq 0,6 \cdot r$.

O excesso de percurso, que é a diferença entre a distância em visada direta e o caminho percorrido pela onda refratada devido ao obstáculo, é definido por:

$$E_p = \frac{h^2}{2} \cdot \frac{(d_1 \cdot d_2)}{d_1 + d_2} \quad (5.3)$$

Pelo cálculo de E_p , é possível encontrar o número de zonas obstruídas:

$$n = \frac{2 \cdot E_p}{\lambda} \quad (5.4)$$

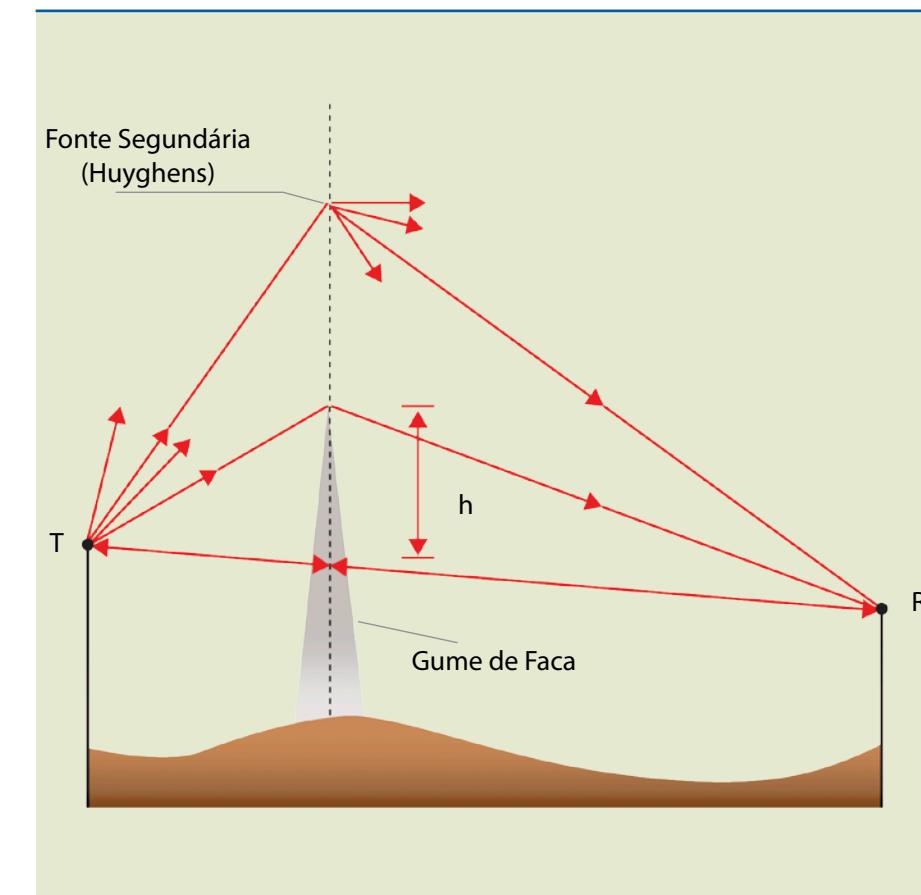
Existe um modelo, denominado **gume de faca**, que é utilizado para determinar a atenuação provocada por difração em obstáculos naturais, como montanhas. A figura 5.15 mostra um exemplo de aplicação desse modelo.

A curva ganho de difração, em função do parâmetro de Fresnel (v), é dada na figura 5.16, com base na relação:

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} = \alpha \sqrt{\frac{2d_1 d_2}{\lambda(d_1 + d_2)}} \quad (5.5)$$

Figura 5.15

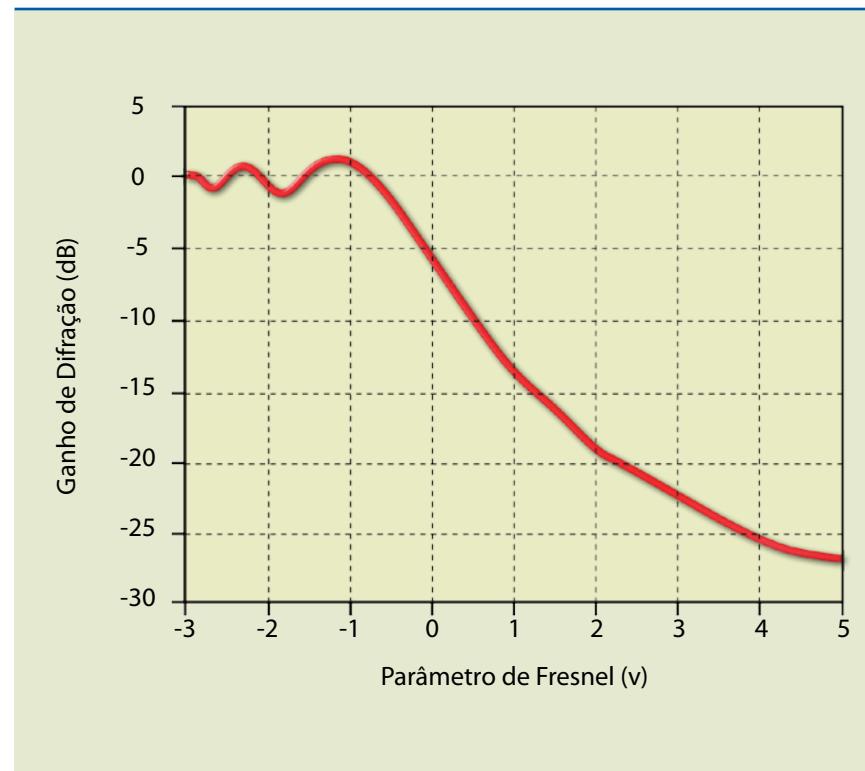
Aplicação do modelo gume de faca.



A expressão que origina o gráfico é:

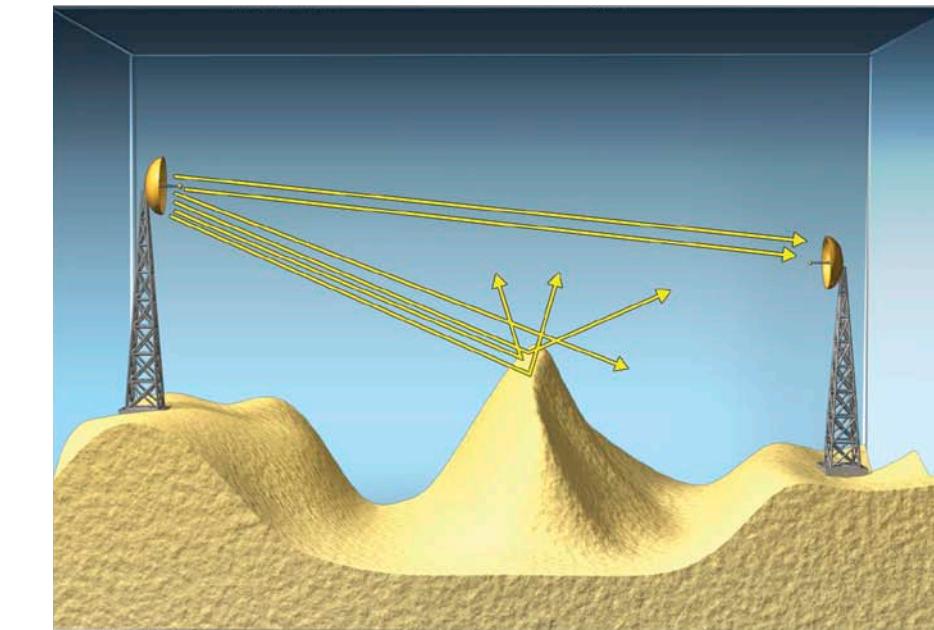
$$-F(v) = (12,953 + 20 \cdot \log v) \text{ dB} \quad (5.6)$$

Figura 5.16
Gráfico do ganho de difração.



Em solos irregulares também pode ocorrer reflexão, por difusão, em várias direções (figura 5.18).

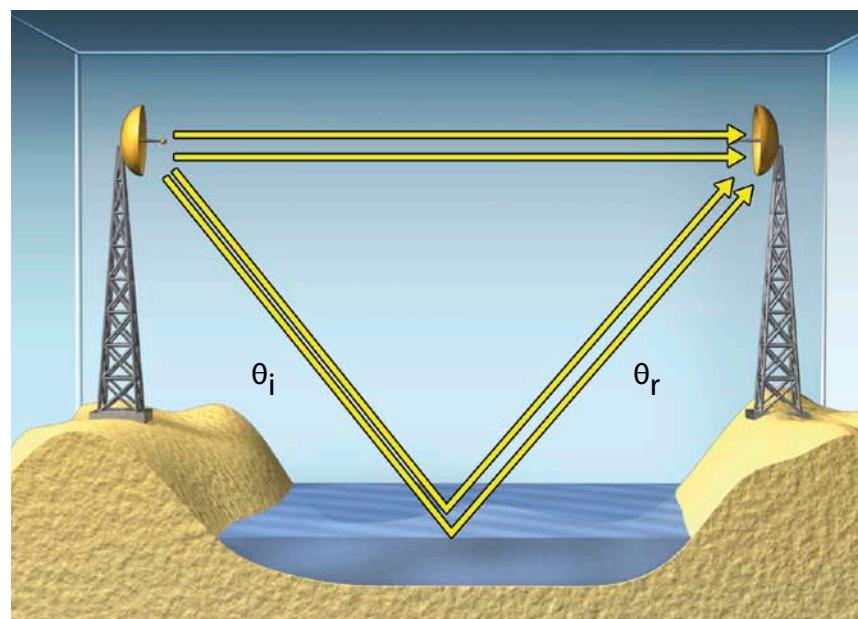
Figura 5.18
Reflexão em solos irregulares.



5.6.2 Reflexão do feixe de micro-ondas

Regiões de planície ou com lagos e mares podem refletir o feixe de micro-ondas, atuando como espelho (figura 5.17); a intensidade da onda refletida depende do ângulo de incidência sobre o espelho e de quão plana é a superfície ($\theta_i = \theta_r$).

Figura 5.17
Reflexão em lago.



A relação entre a amplitude das ondas refletidas e a das ondas incidentes é avaliada por meio de um parâmetro chamado **coeficiente de reflexão** (tabela 5.3). O valor depende do tipo de terreno e varia desde 0 (efeito nulo da reflexão) até 1 (condição de reflexão total).

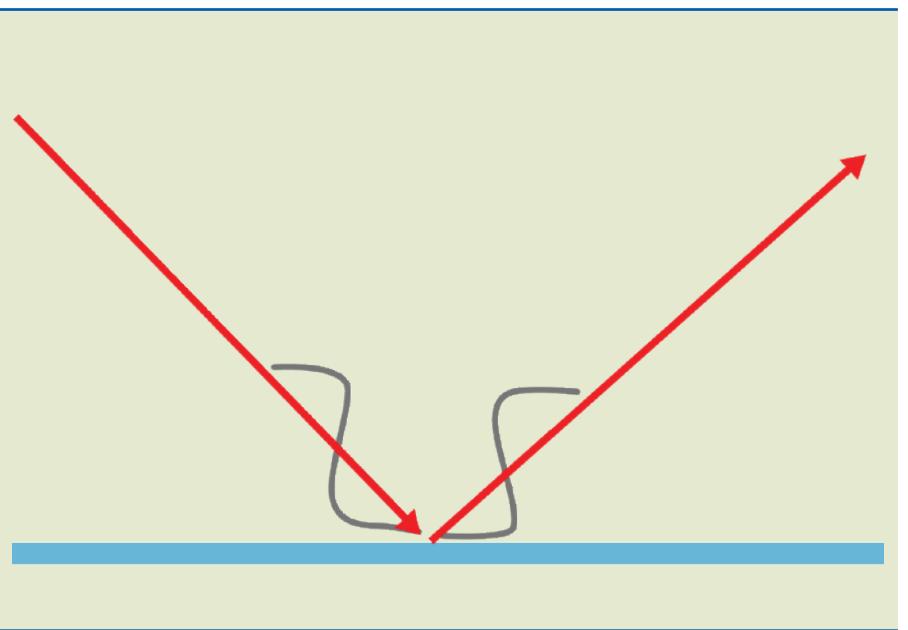
Condição	Coeficiente de reflexão
Mar calmo	~1
Terreno levemente irregular	0,8 a 1
Terreno levemente irregular com vegetação rasteira	0,3 a 0,5
Terreno irregular	0,1 a 0,4
Terreno irregular com árvores	0,05 a 0,2

Tabela 5.3
Coeficientes de reflexão.

Quando uma onda é refletida em um meio, ocorre uma inversão de fase em relação à onda incidente, pelo fato de o campo elétrico horizontal e o campo magnético vertical se anularem na superfície refletora; é necessário, então, que os campos refletidos tenham fase inversa aos incidentes (figura 5.19).

Figura 5.19

Inversão de fase da onda após a reflexão.



A reflexão do feixe de micro-ondas pode causar problemas na recepção do sinal, gerando, por exemplo, atenuação ou anulação do sinal. Para amenizar os efeitos da reflexão, pode-se aumentar a altura das antenas em relação ao obstáculo ou o bloqueio do feixe refletido em obstáculos naturais do percurso.

5.7 Potência do sinal recebido

O cálculo da potência do sinal recebido devido à onda direta, em função da distância, é dado por:

$$P_r(d) = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r}{L_{fs} \cdot L} \quad (5.7)$$

em que:

- $P_r(d)$ é a potência recebida, em watts;
- P_t , a potência de emissão, em watts;
- G_t e G_r são os ganhos das antenas de transmissão e recepção;
- L_{fs} é a atenuação no espaço livre;
- L , outras atenuações.

O cálculo da atenuação no espaço livre é dado por:

$$L_{fs} = 92,45 + 20 \cdot \log(F_0 \cdot d) \quad (5.8)$$

em que:

- F_0 é a frequência de operação, em GHz;
- d , a distância, em km.

Capítulo 6

Antenas

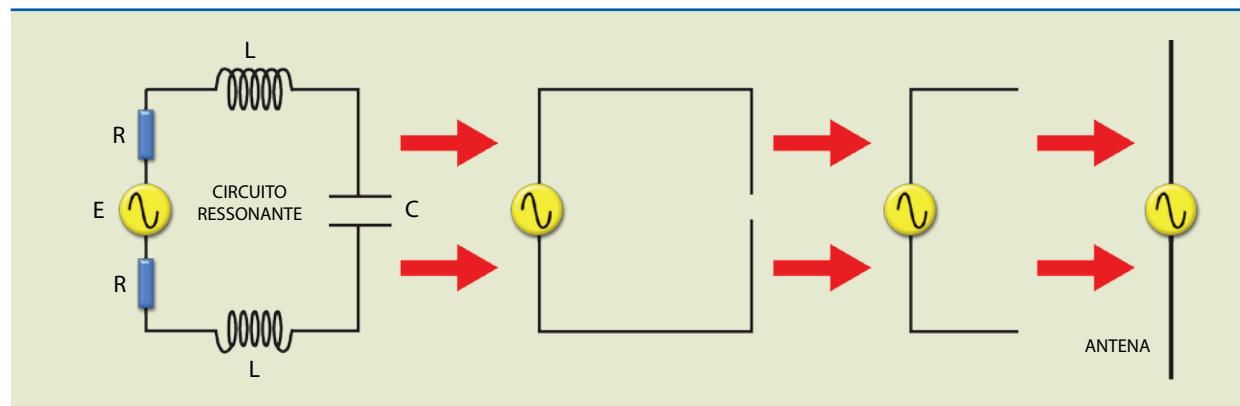
6.1 Definição

A antena é um dispositivo que transforma corrente elétrica de radiofrequência oriunda do transmissor em energia eletromagnética irradiada. Na recepção, a antena realiza o inverso, ou seja, transforma a energia eletromagnética irradiada em corrente de RF para ser entregue ao receptor. Portanto, sua função é primordial em qualquer comunicação em que exista radiofrequência.

Seu dimensionamento é feito em função do comprimento de onda λ , que é definido de acordo com a frequência ou faixa de frequências de operação do sistema rádio.

Uma antena funciona da seguinte maneira: o transmissor produz o sinal da informação na forma de corrente alternada (corrente de radiofrequência). Ao circular na antena de transmissão, a corrente de RF produz uma onda eletromagnética a seu redor, que se irradia pelo ar. Ao atingir uma antena receptora, a onda eletromagnética induz nela uma pequena corrente elétrica, cujas oscilações acompanham o movimento da onda. Essa corrente é muito mais fraca do que a presente na antena transmissora, sendo amplificada no receptor.

Figura 6.1
Círculo ressonante
em série.



A antena tem o comportamento de um circuito ressonante em série, conforme mostra a figura 6.1.

A faixa de operação da antena ou largura de banda é definida quando ela opera próximo à frequência de ressonância, apresentando comportamento praticamente

resistivo, com anulação das impedâncias capacitiva e indutiva do circuito equivalente ressonante. A figura 6.2 apresenta sua curva de resposta de frequência.

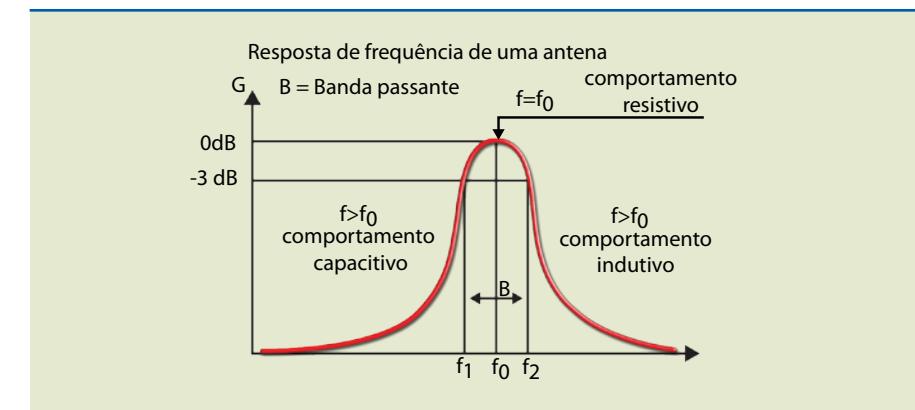


Figura 6.2
Curva de resposta de frequência de uma antena.

Do ponto de vista elétrico, a antena pode ser vista como impedância, com componentes resistivos, capacitivos e indutivos. A impedância da antena na faixa de operação deve ter o mesmo valor apresentado pela linha de transmissão à qual a antena está ligada. Caso contrário, ocorrerá descasamento de impedâncias entre a linha de transmissão e a antena, provocando perdas de energia, devido a reflexões. Essa energia refletida, somada com a energia incidente, gera na linha de transmissão uma onda estacionária, prejudicando a comunicação.

6.2 Diagrama de irradiação

A representação em coordenadas polares da intensidade de campo irradiada ou recebida por uma antena em todas as direções do espaço é chamada de diagrama de irradiação, definido em dois planos: horizontal e vertical (figura 6.3).

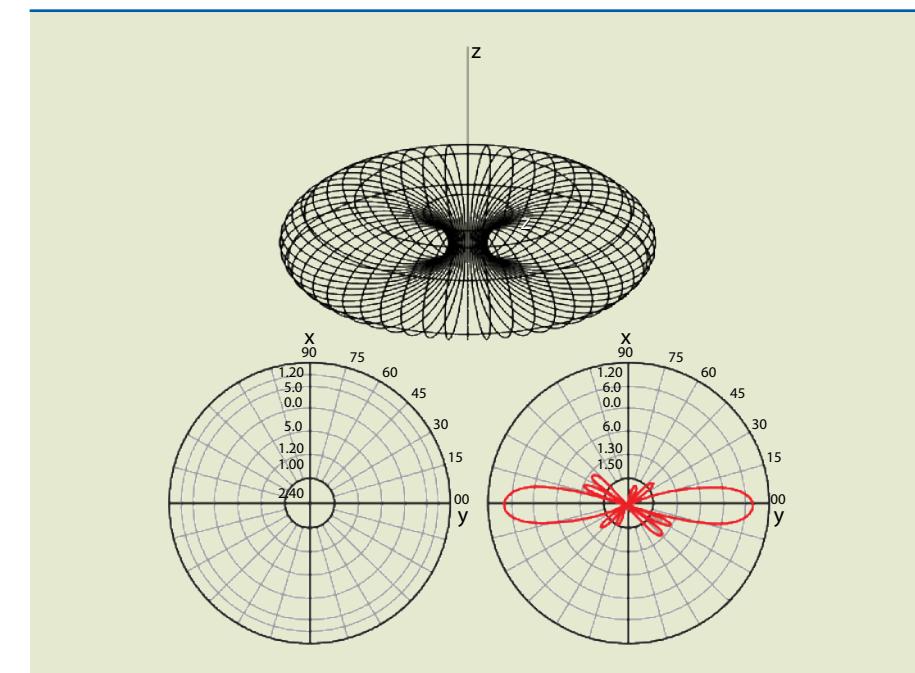


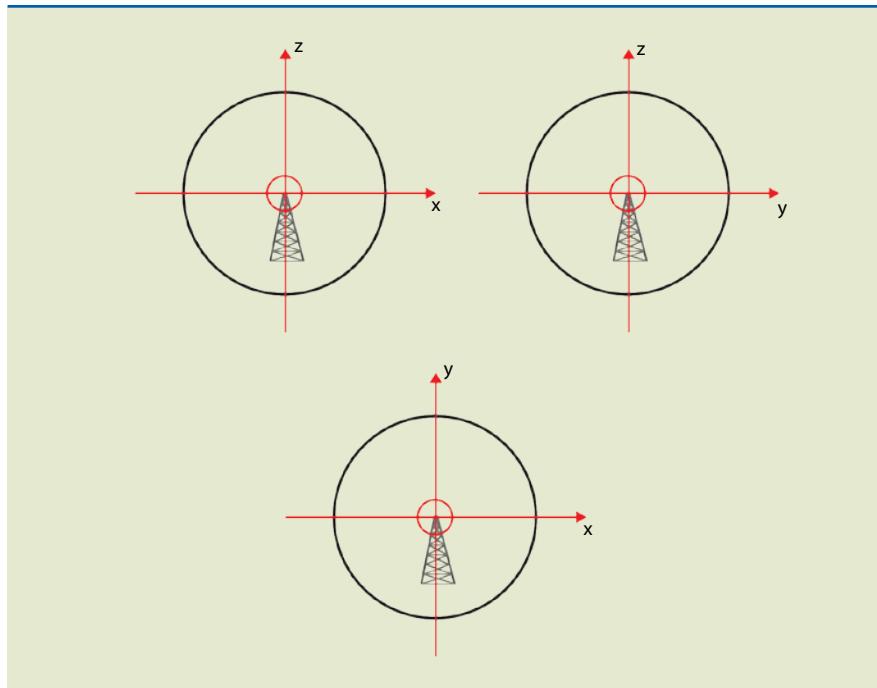
Figura 6.3
Diagramas de irradiação horizontal e vertical de uma antena.

6.3 Antena isotrópica

É uma antena ideal, portanto sem perdas, capaz de captar ou irradiar campos eletromagnéticos igualmente em todas as direções. Seu diagrama de irradiação é ilustrado na figura 6.4.

Figura 6.4

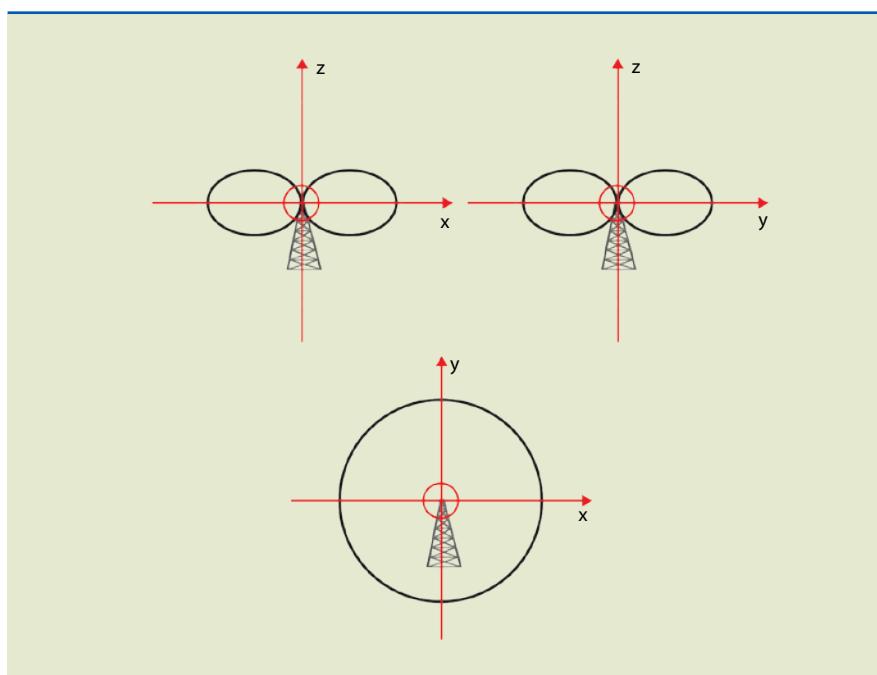
Diagrama de irradiação da antena isotrópica.



Na prática, a antena que mais se aproxima da antena isotrópica é a omnidirecional, cujo diagrama de irradiação é mostrado na figura 6.5.

Figura 6.5

Diagrama de irradiação de uma antena omnidirecional real.



6.4 Polarização

Vimos anteriormente que a direção do vetor campo elétrico define a polarização de uma onda:

- Se o vetor está na vertical, a onda está polarizada verticalmente.
- Se o vetor está na horizontal, a onda está polarizada horizontalmente.
- Se o vetor gira no sentido horário, a polarização é circular direita.
- Se o vetor gira no sentido anti-horário, a polarização é circular esquerda.

6.5 Largura de feixe α

É o ângulo formado pelos dois pontos em que o campo máximo reduz seu valor em 0,707, ou seja, -3 dB (figura 6.6).

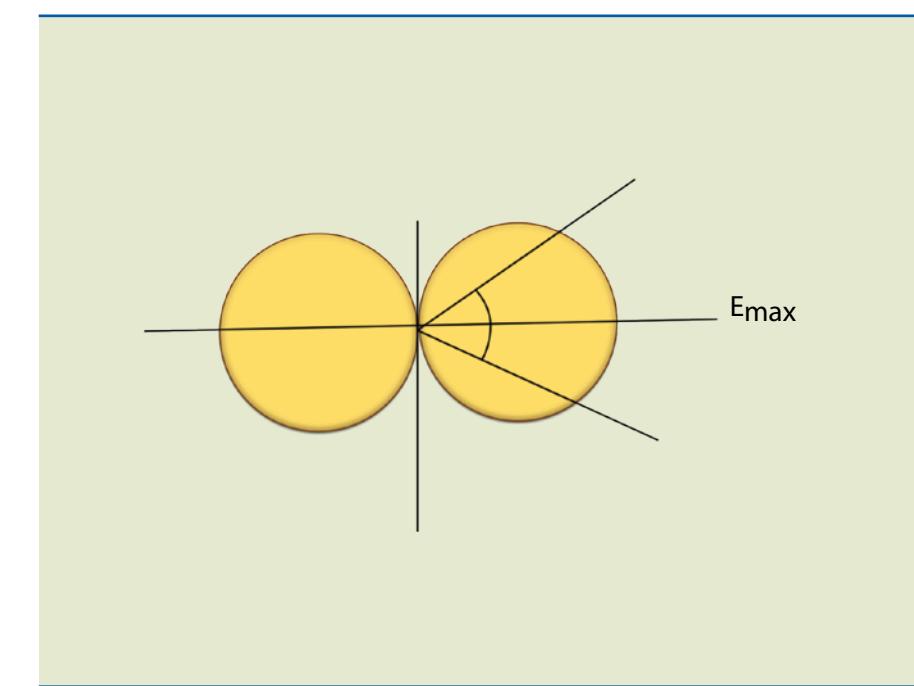


Figura 6.6

Largura de feixe da antena.

6.6 Eficiência η

É a relação entre a potência realmente irradiada por uma antena e a potência a ela entregue pelo transmissor. A parte de potência não irradiada corresponde a perdas por dissipação térmica, fugas de RF nos conectores e isoladores, descasamento de impedâncias e despolarização da onda. Pode ser determinada por:

$$\eta\% = \frac{P_{ir}}{P_{tx}} \cdot 100 \quad (6.1)$$



6.7 Diretividade

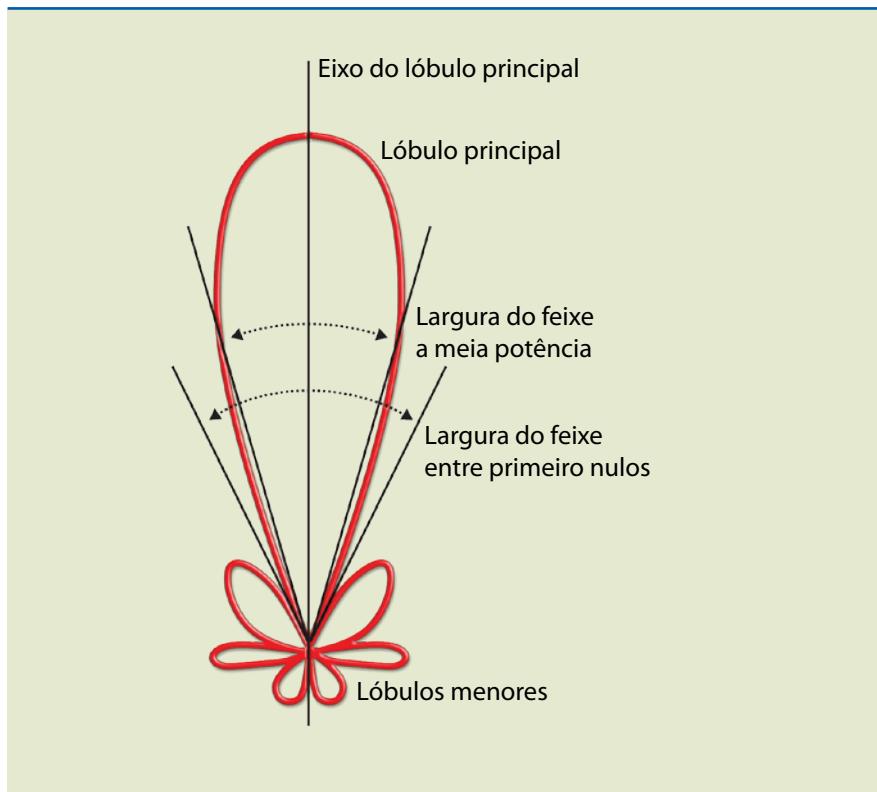
Direção de maior incidência de irradiação de sinal pela antena, definida pela relação entre o campo irradiado por essa antena em determinada direção e o campo irradiado pela antena isotrópica em determinada potência:

$$D = \frac{E}{E_{iso}} \quad (6.2)$$

O diagrama de irradiação da antena pode indicar sua diretividade (figura 6.7).

Figura 6.7

Diretividade de uma antena.



Quanto maior for o valor de D, mais diretiva será a antena. Para a antena isotrópica, $D = 1$.

A intensidade de campo irradiado pela antena pode ser determinado pela expressão:

$$E = P_r \cdot r^2 \quad (6.3)$$

em que:

- P_r é a densidade de potência, em watts.
- r , o raio do lóbulo de maior irradiação, em metros.

Para a antena isotrópica, que irradia igualmente em todas as direções, o volume de energia terá o formato de uma esfera, portanto:

$$P_r = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (6.4)$$

6.8 Ganho da antena

É o produto da eficiência pela diretividade da antena, em dBi:

$$G = n \cdot D \quad (6.5)$$

6.9 Relação frente-costas

É a relação entre a potência irradiada em uma direção predominante e a potência irradiada no mesmo eixo, mas no sentido oposto, expressa em dB:

$$R_{fc} = 10 \cdot \log \frac{P_f}{P_c} \quad (6.6)$$

6.10 EIRP (effective isotropic radiation power)

É a potência da transmissão aplicada na antena isotrópica que proporciona o mesmo resultado da antena direcional em uso. Muito utilizada em comunicações na faixa de micro-ondas, principalmente em sistemas via satélite, é determinada por:

$$\text{EIRP(dBW)} = P_t(\text{dBW}) + G(\text{dBi}) \quad (6.7)$$

em que:

- P_t é a potência de transmissão, em dBW;
- G , o ganho da antena, em dBi.

6.11 Tipos de antenas

Os principais tipos de antenas são: dipolo, dipolo de meia onda, dipolo dobrado, dipolo de quarto de onda, Yagi-Uda e parabólica.

6.11.1 Antena dipolo

Formada basicamente por duas hastes condutoras, alimentadas pelo centro, por meio de uma linha de transmissão (par de fios ou cabo coaxial), por gerador de corrente de

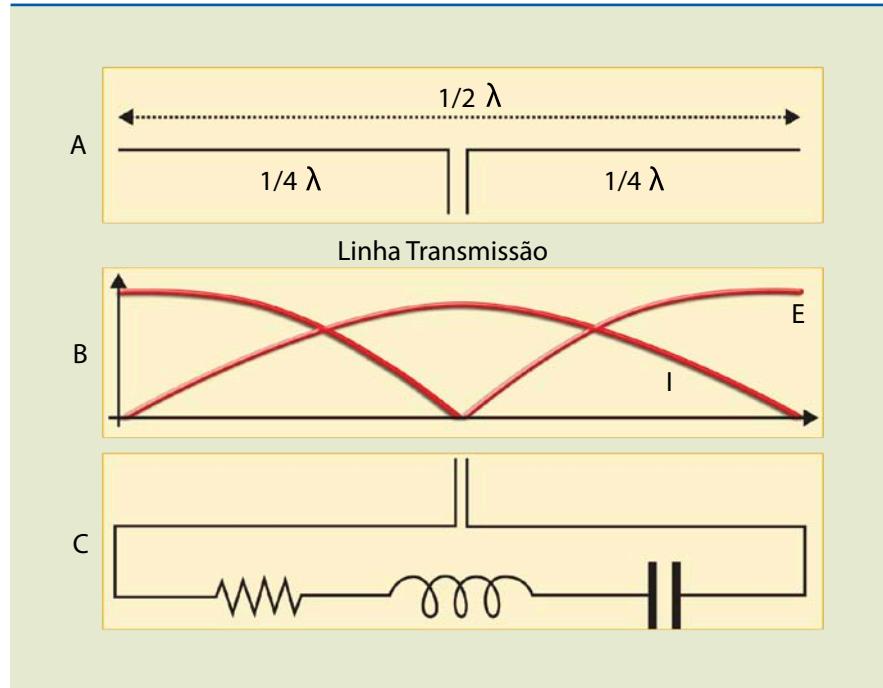


radiofrequência. O comprimento físico das hastas é igual ao comprimento de onda do sinal irradiado, de acordo com sua faixa de frequências de operação.

6.11.2 Antena dipolo de meia onda

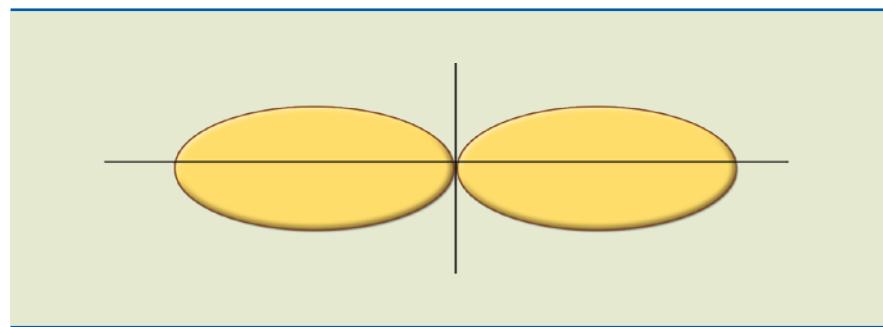
Formada por dois condutores retilíneos, cada um com comprimento de $1/4 \lambda$ do comprimento de onda da radiação a ser emitida ou recebida (figura 6.8).

Figura 6.8
Dipolo de meia onda.



A impedância da antena dipolo de meia onda é de aproximadamente 75Ω . Em relação à largura de feixe, $\alpha = 78^\circ$. Sua relação frente-costas é de 1:1 e o ganho é de 2,15 dBi. O diagrama de irradiação dessa antena é mostrado na figura 6.9.

Figura 6.9
Diagrama de irradiação
da antena dipolo
de meia onda.



6.11.3 Antena dipolo dobrado

Formada por dois dipolos de meia onda em paralelo. Nessa situação, a impedância é multiplicada por $2^2 = 4$. Portanto, $Z = 4 \cdot 72 = 288 \Omega$. Tem valor

de impedância próximo ao das linhas de transmissão bifilares de 300Ω e é bastante recomendada em sinais de VHF, como nas transmissões de TV (figura 6.10).

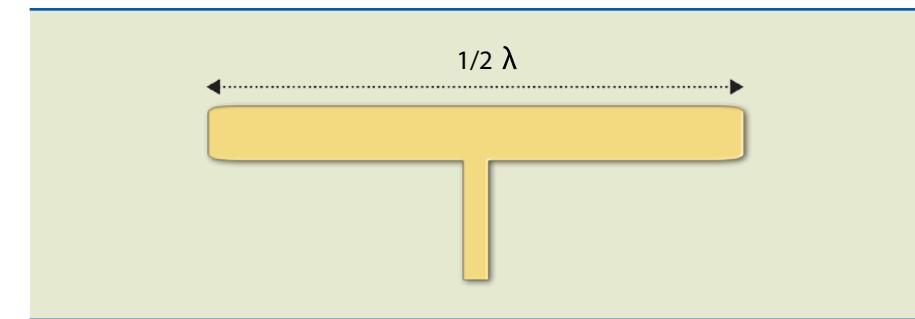


Figura 6.10
Dipolo dobrado.

6.11.4 Antena dipolo de quarto de onda

Muito utilizada em comunicações móveis, tem funcionamento omnidirecional no plano horizontal (figura 6.11). O elemento excitador é um condutor vertical retilíneo de comprimento igual a $1/4 \lambda$, que é ligado ao condutor central da linha de transmissão (cabo coaxial). Os elementos auxiliares fazem o plano de terra horizontal e as ondas refletidas interagirem com a incidente, resultando em distribuição uniforme no plano horizontal. A impedância característica está na faixa dos 36Ω .

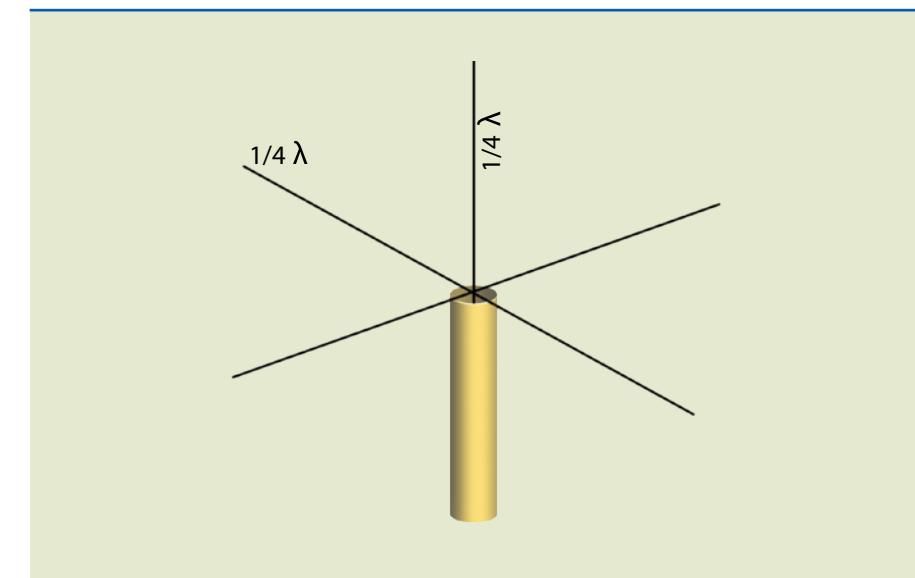


Figura 6.11
Dipolo de quarto de onda.

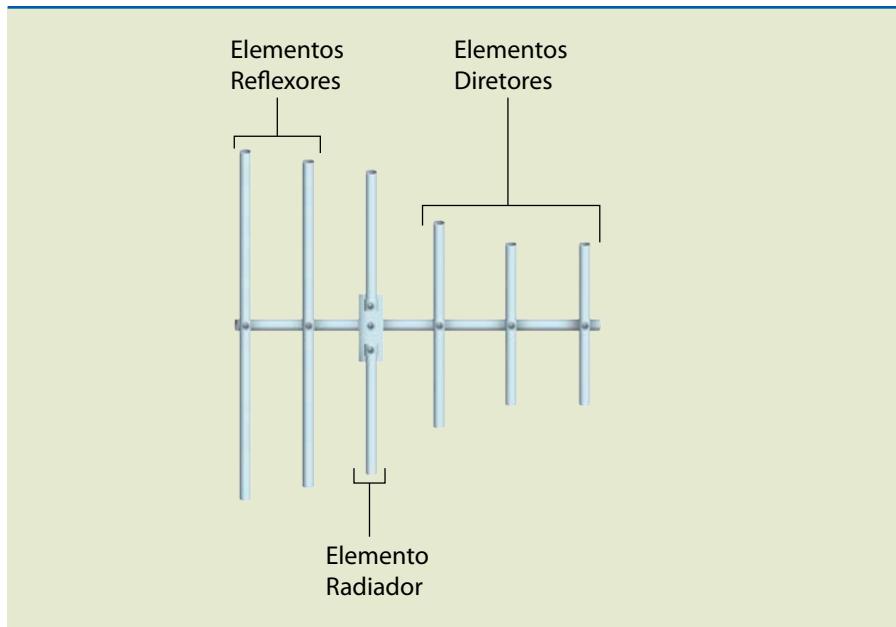
6.11.5 Antena Yagi-Uda

Formada por dipolos em paralelo sobre um mesmo eixo, o principal deles chamado excitador, e elementos parasitas, denominados refletores e diretores, com a função de elevar o ganho da antena e sua relação frente-costas, diminuindo a largura do feixe.

Os refletores ficam posicionados atrás do dipolo principal, funcionando como atenuadores das ondas incidentes pelas costas. Os diretores são posicionados na frente do dipolo principal, com o propósito de aumentar a diretividade da antena. Sua configuração é apresentada na figura 6.12.

Figura 6.12

Elementos de uma antena Yagi-Uda.

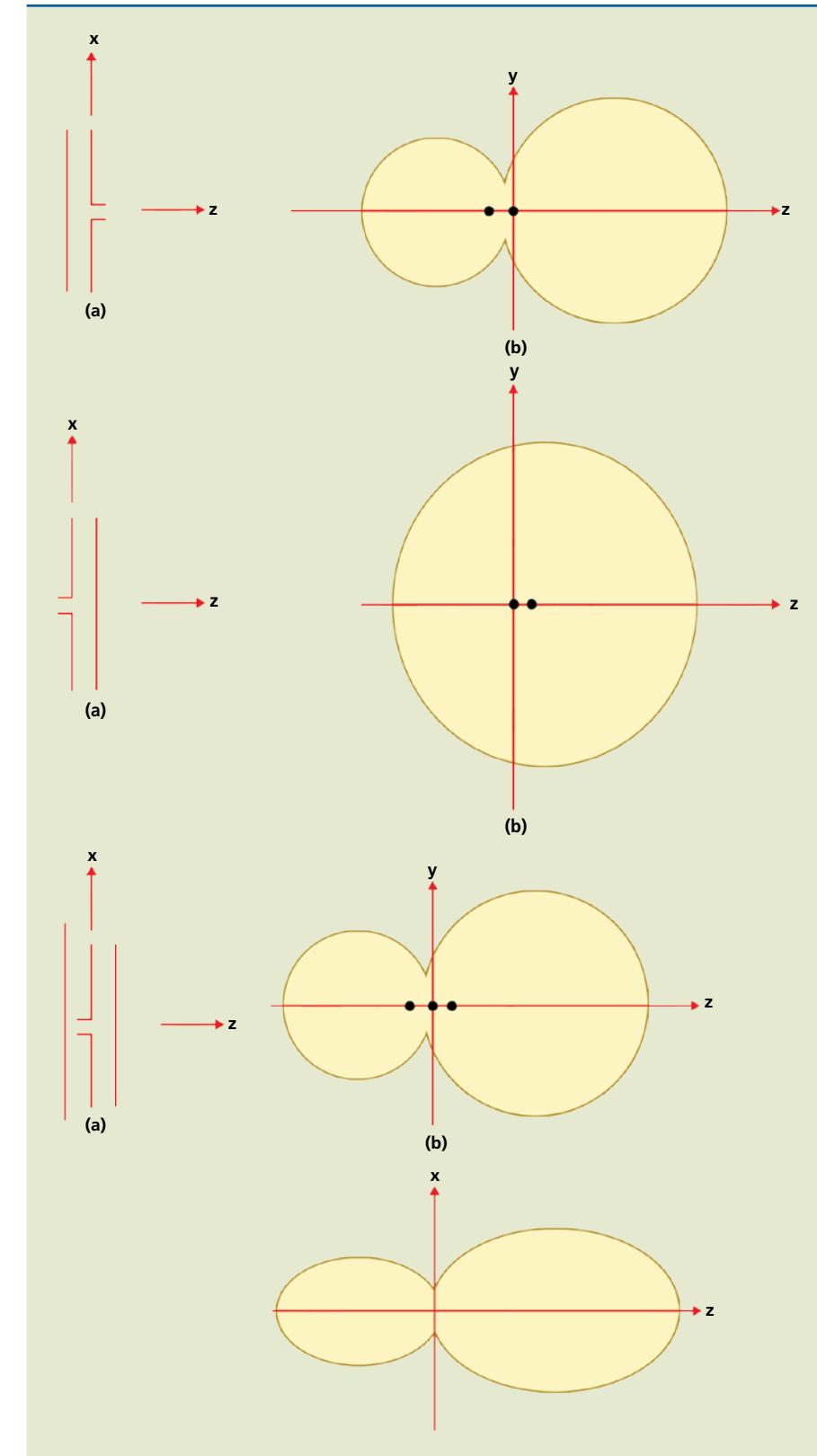
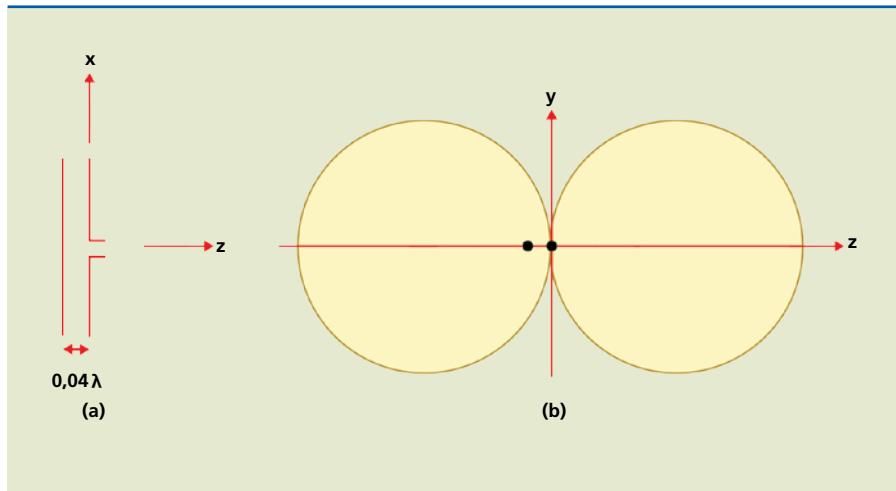


Em sua configuração mais simples, esse tipo de antena possui dipolo radiador, além de um dipolo refletor. O grande número de dipolos reflexores e diretores ajuda a aumentar o ganho da antena projetada, em relação a outra com menos dipolos.

A antena Yagi-Uda funciona da seguinte maneira: a alimentação é feita no dipolo principal, o excitador. Essa corrente excita os diretores e os refletores. A reirradiação resulta em uma superposição do campo elétrico no elemento ativo, provocando aumento de ganho. Na figura 6.13 é possível ter uma ideia dos diagramas de irradiação da antena Yagi-Uda, de acordo com o número de elementos que a compõem.

Figura 6.13

Diagramas de irradiação de uma antena Yagi-Uda.



Podemos observar que, à medida que são inseridos elementos parasitas, o diagrama de irradiação da antena é alterado. Os espaçamentos entre os elementos

diretor, refletor e ativo e as dimensões desses elementos determinam as características de irradiação e impedância de entrada da antena, como mostram a tabela 6.1 e a figura 6.14, em que:

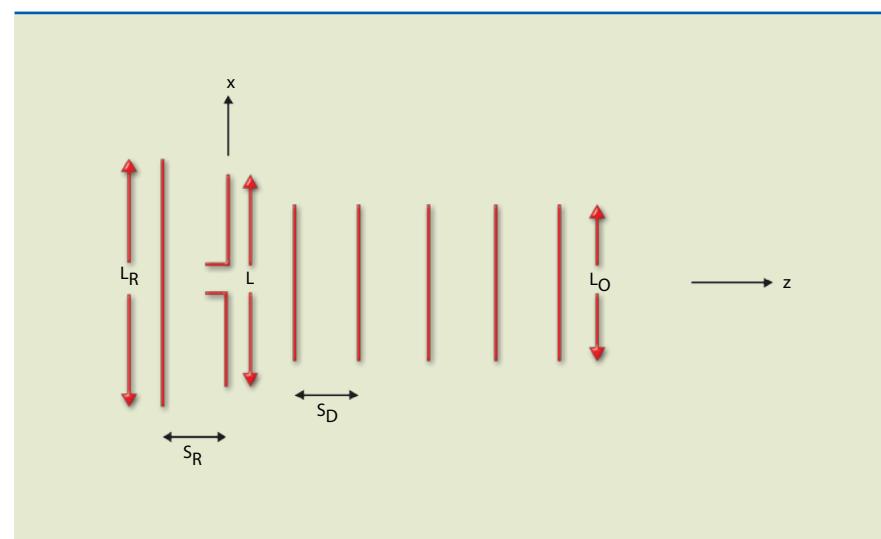
- N é o número de elementos;
- L_R , o tamanho do refletor;
- L , o tamanho do elemento ativo;
- L_D é o tamanho do diretor.

Tabela 6.1
Características da antena Yagi-Uda

N , nº de Elem.	Espaçamento	L_R	L	L_D	ganho	relação frente/costa	Impedância entrada	HPH	HPE
3	0,25	0,479	0,453	0,451	9,4	5,6	$22,3 + j15,0$	84	66
4	0,15	0,486	0,456	0,453	9,7	8,2	$36,7 + j9,6$	84	66
4	0,20	0,503	0,474	0,463	9,3	7,5	$5,6 + j20,7$	64	54
4	0,25	0,486	0,463	0,456	10,4	6,0	$10,3 + j23,5$	60	52
4	0,30	0,475	0,453	0,446	10,7	5,2	$25,8 + j23,2$	64	56
5	0,15	0,505	0,476	0,456	10,0	13,1	$9,6 + j13,0$	76	62
5	0,20	0,486	0,462	0,449	11,0	9,4	$18,4 + j17,6$	68	58
5	0,25	0,477	0,451	0,442	11,0	7,4	$53,3 + j6,2$	66	58
5	0,30	0,482	0,459	0,451	9,3	2,9	$19,3 + j39,4$	42	40
6	0,20	0,482	0,456	0,437	11,2	9,2	$51,3 + j1,9$	68	58
6	0,25	0,484	0,459	0,446	11,9	9,4	$23,2 + j21$	56	50
6	0,30	0,472	0,449	0,437	11,6	6,7	$61,2 + j7,7$	56	52
7	0,20	0,489	0,463	0,444	11,8	12,6	$20,6 + j16,8$	58	52
7	0,25	0,477	0,454	0,434	12,0	8,7	$57,2 + j1,9$	58	52
7	0,30	0,475	0,455	0,439	12,7	8,7	$35,9 + j21,7$	50	46

Figura 6.14

Relação entre as características técnicas da antena Yagi-Uda.



6.11.6 Antena parabólica

Vimos que, à medida que a frequência do sinal aumenta, seu comprimento de onda diminui, refletindo diretamente no comprimento da antena de transmissão ou de recepção. Desse modo, a antena necessita de um elemento capaz de melhorar a concentração de feixes de onda, ou seja, um refletor. Com tal elemento, a diretividade e o ganho da antena aumentam.

As antenas que operam na faixa de micro-ondas possuem um refletor parabólico, capaz de concentrar os feixes de onda perpendiculares ao plano da antena em um ponto específico, chamado foco, exatamente onde a antena é posicionada (figura 6.15).

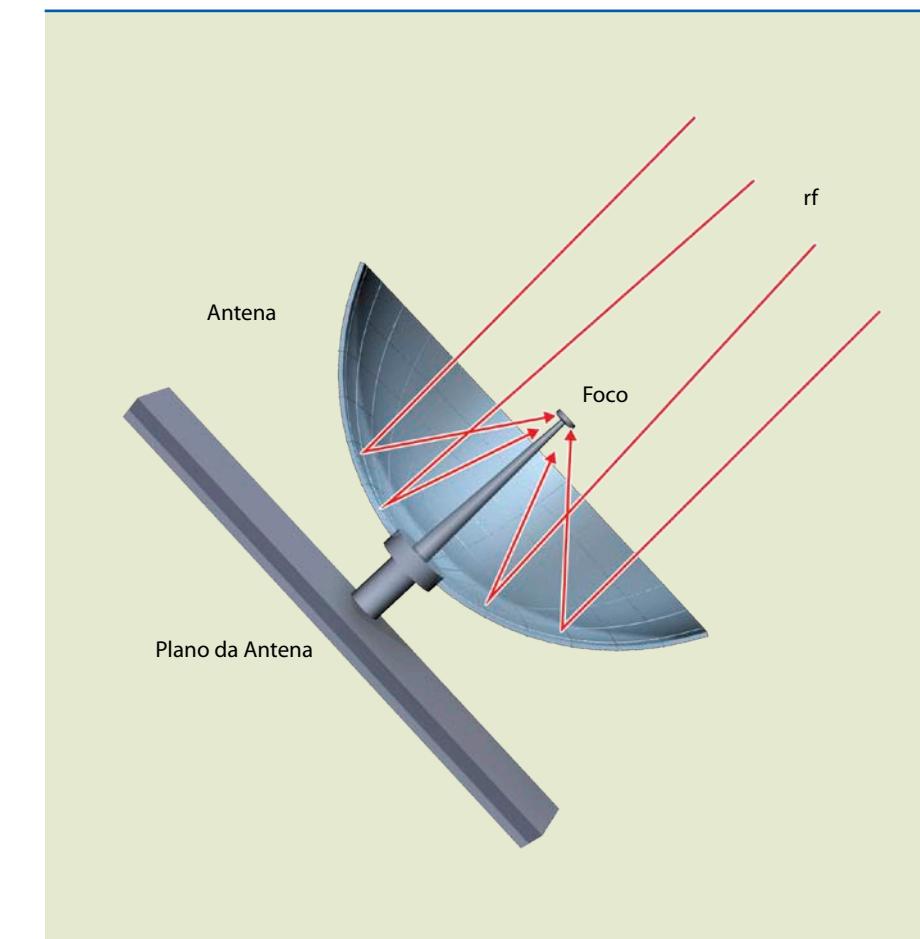


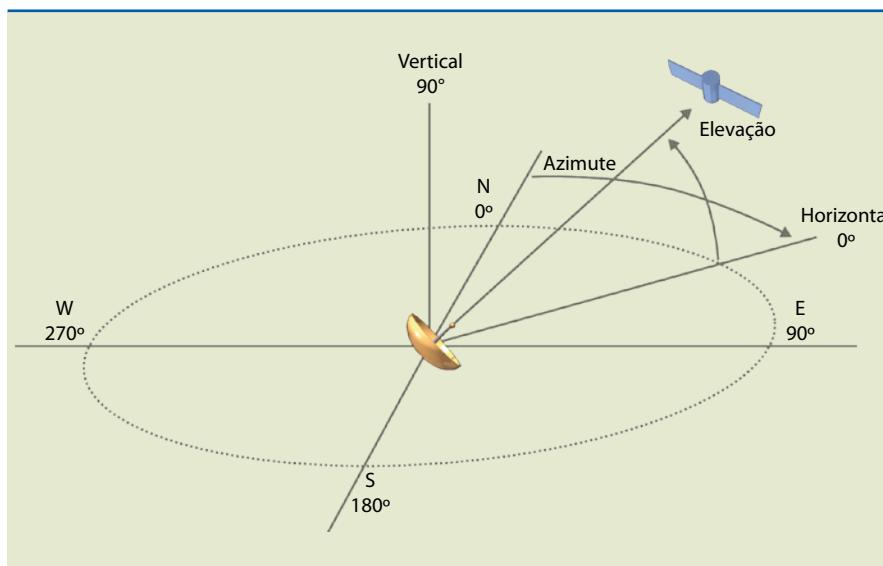
Figura 6.15
Sinais perpendiculares incidindo na parábola.

Para o correto posicionamento de uma antena parabólica, é preciso levar em consideração dois aspectos (figura 6.16):

- **Ângulo de elevação** – Inclinação da antena (em graus) em relação ao solo.
- **Azimute** – Posicionamento da antena em relação ao Norte (direita/esquerda). Por exemplo, um azimute de 15° significa que a antena ficará apontada 15° à direita do norte; um azimute de 345°, que a antena ficará 15° à esquerda do norte ($345^\circ - 360^\circ = -15^\circ$).

Figura 6.16

Posicionamento de uma antena parabólica.



Como a antena parabólica possui diretividade alta, qualquer ângulo de elevação (vertical) ou azimute (horizontal) fora de posição pode causar perda de recepção de um sinal de satélite.

O ganho de uma antena parabólica varia entre 20 e 35 dBi. Entretanto, não apresenta rendimento muito elevado, da ordem de 55%, devido a perdas de energia.

Uma antena parabólica típica para recepção de sinais de satélite é formada por (figura 6.17):

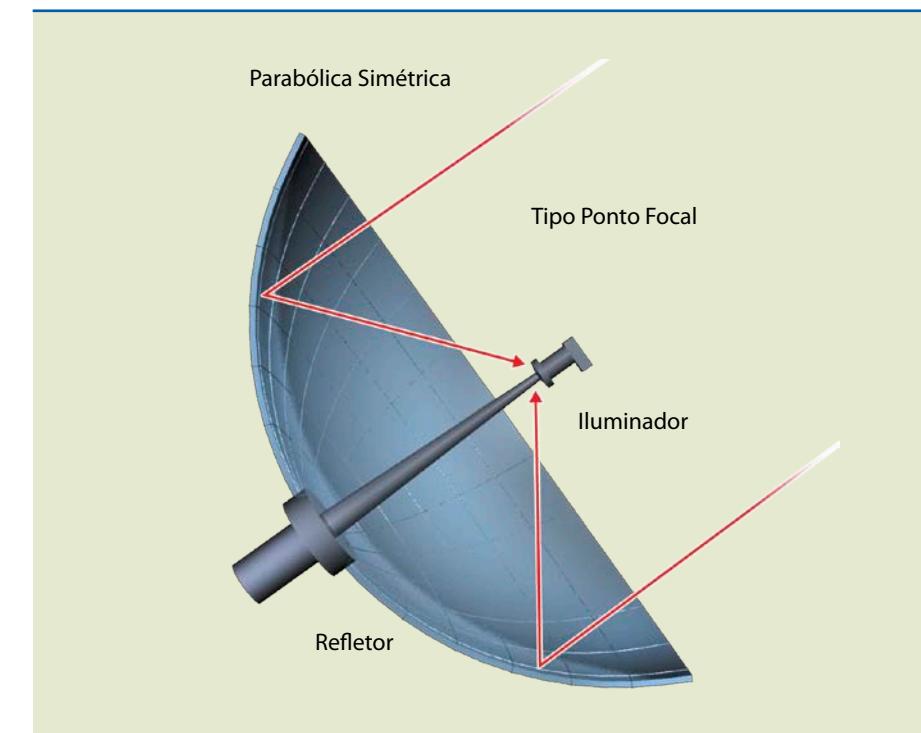
- **Refletor parabólico** – Direciona todo o sinal recebido para o foco.
- **Iluminador** – Segura a corneta corrugada.
- **Corneta corrugada ou feedhorn** – Guia os sinais emitidos pelo refletor até o dipolo que fica em seu interior.
- **Polo rotor** – Coloca o dipolo na polarização vertical ou horizontal.
- **Elemento amplificador (LNA, LNB, LNC)** – Amplifica os sinais recebidos. O LNB e o LNC também convertem o sinal recebido para uma frequência mais baixa.

Tipos e diferenças entre os elementos amplificadores:

- **LNA (low noise amplifier – amplificador de baixo ruído)** – Faz apenas a amplificação do sinal. Foi o primeiro tipo a ser utilizado, operando na banda C de recepção via satélite, na faixa de 3,7 a 4,2 GHz.
- **LNB (low noise blockconverter – conversor de baixo ruído)** – Amplifica o sinal recebido na faixa de 3,7 a 4,2 GHz e o converte para a faixa de 950 a 1 450 MHz. Atualmente é o mais empregado.
- **LNC (low noise block downconverter – conversor “abaixador” de baixo ruído)** – Amplifica o sinal recebido e o converte para a frequência de 70 MHz. É usado principalmente na recepção de dados via satélite.

Figura 6.17

Elementos de uma antena parabólica.



Outro tipo de antena parabólica é a **Cassegrain**, de duplo refletor. Seu diferencial é o telescópio desenvolvido por William Cassegrain no século XVII. Nessa antena, o sinal recebido é refletido duas vezes, uma pelo receptor principal e outra pelo sub-refletor, de forma hiperbólica, chegando ao elemento amplificador, posicionado atrás da antena. Para que o elemento amplificador possa receber o sinal, o centro da antena é vazado. A antena Cassegrain apresenta melhor ganho do que a parabólica com um único refletor (figuras 6.18 e 6.19).

Figura 6.18

Incidência de ondas na antena Cassegrain.

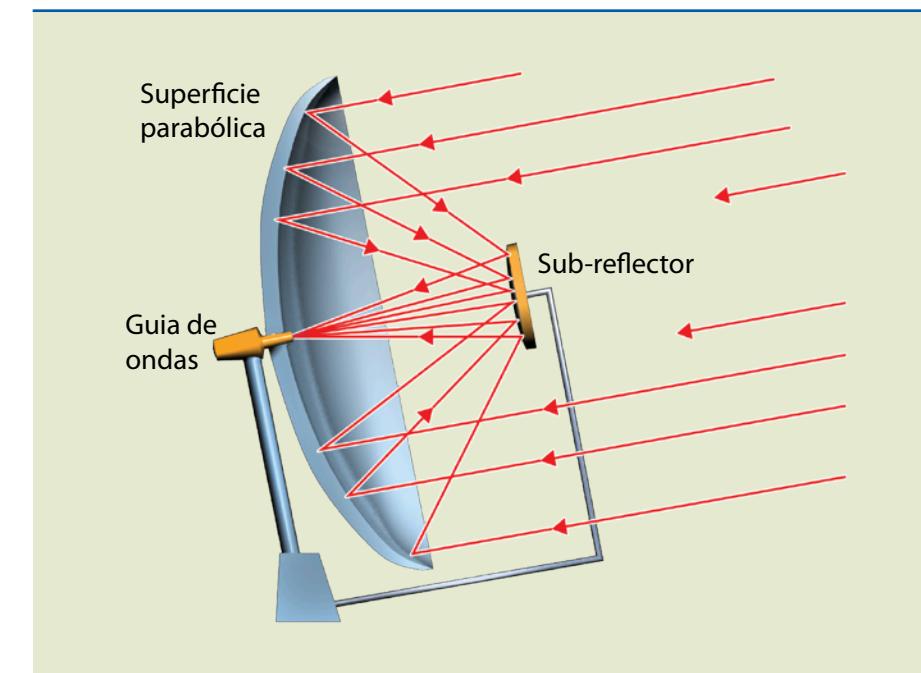


Figura 6.19
Antena Cassegrain.



Capítulo 7

Linhas de transmissão

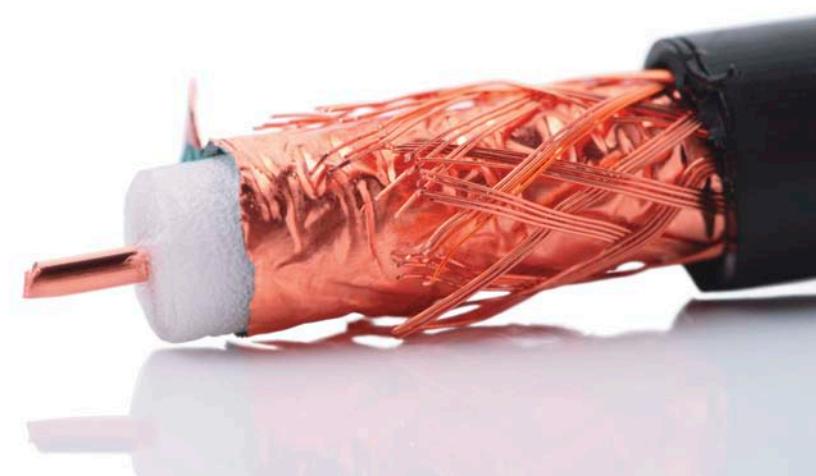


7.1 Definição

Linha de transmissão (LT) é um par de condutores destinado a transportar uma corrente de RF gerada entre o transmissor e a antena. São exemplos de linhas de transmissão: cabo coaxial, linha bifilar, linha microstrip e guias de onda.

O **cabo coaxial** é formado por dois condutores, dispostos de tal maneira que um deles funciona como blindagem do outro. Esses condutores estão separados por um material dielétrico (figura 7.1). O condutor externo normalmente é substituído por uma malha metálica. Os cabos coaxiais apresentam impedância de 50 e 75 Ω , podendo ser aplicados conforme as especificações técnicas do projeto.

Figura 7.1
Estrutura de um cabo coaxial.



A **linha bifilar** é composta por um par de fios condutores, isolados por uma capa plástica de formato achatado. Esse tipo de condutor normalmente é utilizado na conexão de antenas de VHF ao aparelho de TV, com impedância característica de 300 Ω . É muito suscetível a ruído e apresenta grande irradiação do sinal conduzido, além de possíveis acoplamentos entre duas linhas, devido à existência de campos eletromagnéticos induzidos no espaço envolvente entre os condutores (figura 7.2).

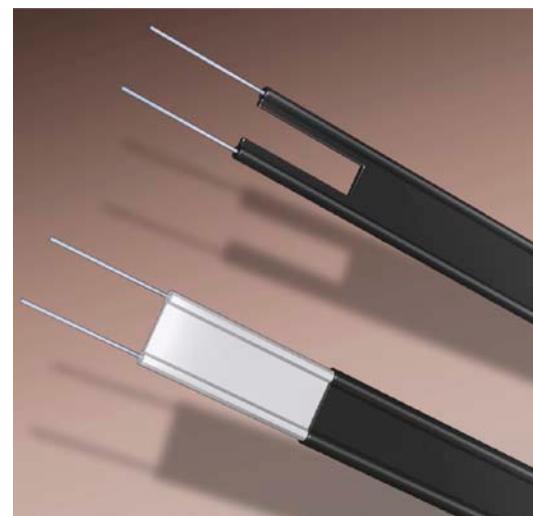


Figura 7.2
Linha bifilar.

A **linha microstrip** é constituída por uma fita de material condutor fixada sobre um dielétrico e, na outra face, uma placa metálica ligada à terra (figura 7.3).

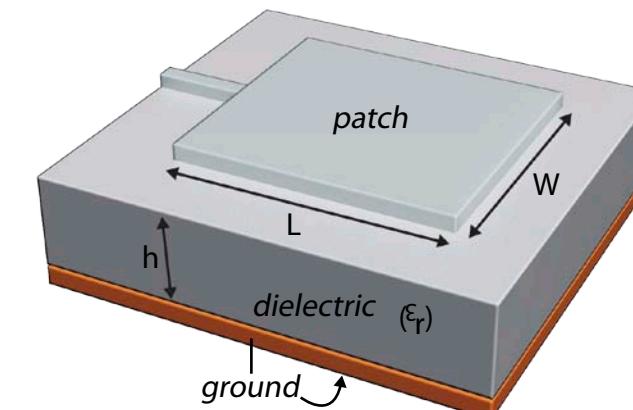


Figura 7.3
Linha microstrip.

De comprimento físico muito pequeno, as linhas microstrip são projetadas para frequências tipicamente superiores a 300 MHz, nas faixas de micro-ondas e ondas milimétricas. Nessas faixas, o comprimento de onda se torna suficientemente pequeno para a construção de linhas com base em tecnologia de circuito impresso.

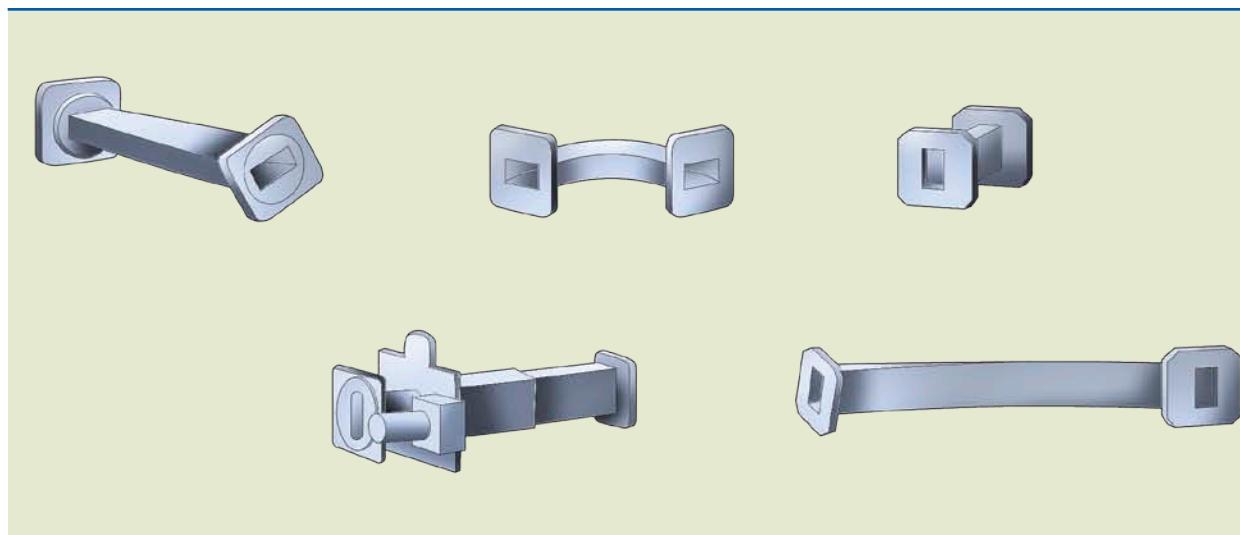
Os **guias de onda** são tubos metálicos ocos ou preenchidos com material dielétrico utilizados para a transmissão de energia em altas frequências, na faixa de micro-ondas em SHF (*super high frequency*).

Devido à baixa atenuação, funcionam como sistema de alimentação das antenas parabólicas na faixa de micro-ondas, podendo ser (figura 7.4):

- Guias de onda elípticos.
- Guias de onda retangulares.
- Guias de onda circulares.

Figura 7.4

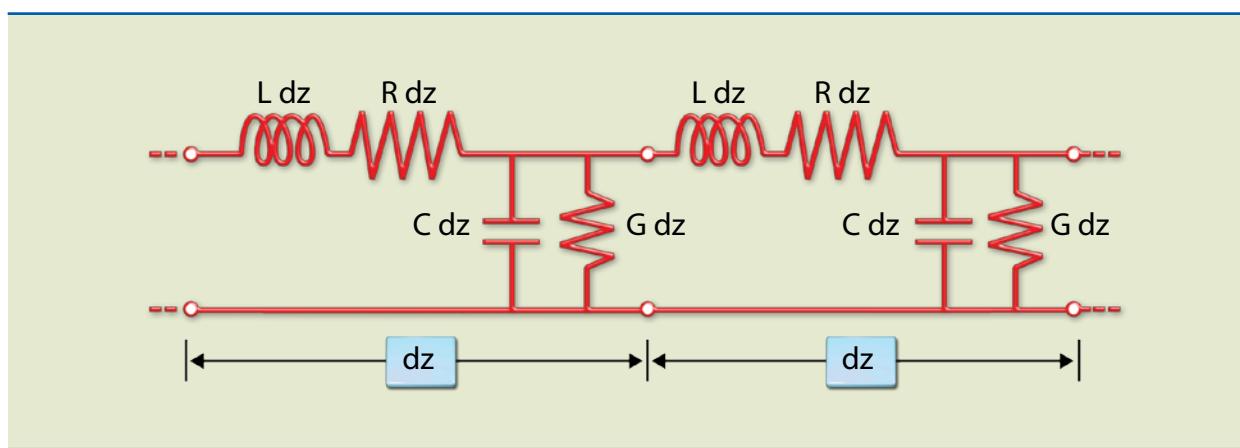
Tipos de guias de onda.

**Figura 7.5**

7.2 Características de uma linha de transmissão

Círculo equivalente de uma linha de transmissão.

O **círculo equivalente** de uma linha de transmissão é apresentado na figura 7.5.



A **impedância característica** da linha de transmissão é dada por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{(j\omega L + R)}{(j\omega C + G)}} \quad (7.1)$$

em que:

- R é a resistência por unidade de comprimento;
- C, a capacidade por unidade de comprimento;

- L, a indutância por unidade de comprimento;
- G, a condutância por unidade de comprimento;
- $j\omega L$ é a reatância indutiva;
- $1/j\omega C$, a reatância capacitativa.

Para linhas de transmissão com perdas desprezíveis, os valores de R e G são extremamente pequenos em relação às reatâncias indutiva e capacitativa da linha. Desse modo, podemos determinar a impedância da linha da seguinte maneira:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (7.2)$$

Tomemos como exemplo o cabo RG058:

- C = 101 pF/m
- L = 252,5 nH/m
- $Z_0 = 50 \Omega$

A **atenuação** da linha de transmissão é definida por meio da comparação dos valores de amplitude da tensão ou corrente na entrada e na saída da linha, em dB/m:

$$A = 20 \cdot \log \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (7.3)$$

$$= 10 \cdot \log \frac{I_{out}}{I_{in}} \quad (7.4)$$

A **frequência de corte** é o valor máximo de frequência da onda a ser aplicada na LT. Acima desse valor, haverá perdas na transmissão.

7.3 Casamento de impedâncias

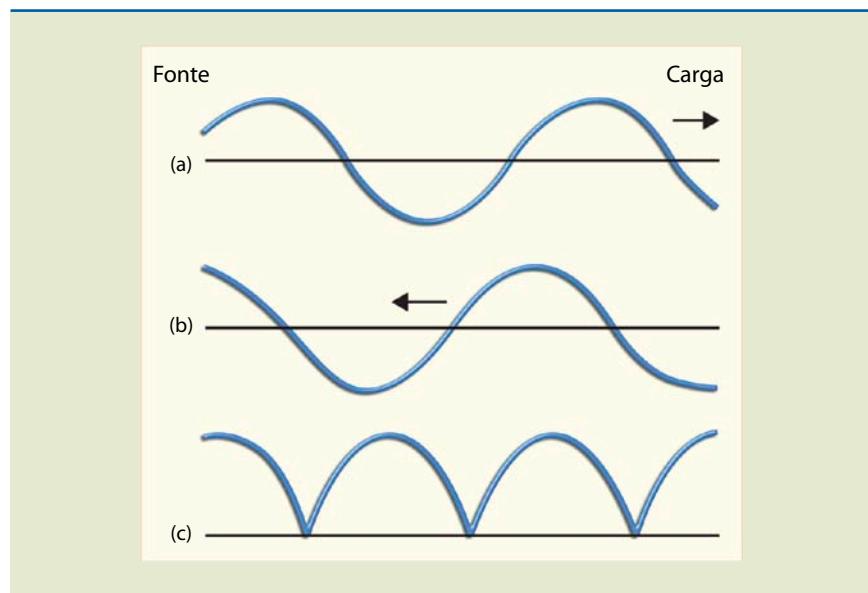
O casamento de impedâncias em uma linha de transmissão ocorre quando sua impedância é igual à impedância de uma carga conectada a ela e quando há absorção total da potência incidente sobre a carga. Nessa situação, pode-se admitir que todos os pontos da linha estarão com tensão e corrente nas amplitudes máximas e fases constantes. Entretanto, se a linha estiver descasada, surgirá uma onda refletida na LT, além da onda incidente na carga, provocando dissipação parcial da potência sobre o transmissor e perdas.

Ondas estacionárias são ondas refletidas na antena e decorrentes dela que transitam pela LT. Essas ondas provocam superaquecimento do estágio de saída do transmissor e, consequentemente, reduzem o rendimento da transmissão (figura 7.6).

Na prática, sempre ocorre algum descasamento na LT.

Figura 7.6

- (a) Sinal incidente na carga,
 (b) onda refletida e
 (c) onda estacionária.



7.3.1 Taxa de onda estacionária (SWR – standing wave ratio)

É a relação entre as amplitudes máxima e mínima de tensão ou corrente ao longo da linha de transmissão:

$$\text{SWR} = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (7.5)$$

Também pode ser expressa das seguintes maneiras:

$$\text{SWR} = \frac{Z_L}{Z_0}, \text{ para } Z_L > Z_0 \quad (7.6) \text{ ou: } \text{SWR} = \frac{Z_0}{Z_L}, \text{ para } Z_0 > Z_L \quad (7.7)$$

7.3.2 Coeficiente de reflexão

É a razão entre a altura da onda refletida e a altura da onda incidente ou a razão entre a energia refletida e a energia incidente. Varia entre 1 (quando se verifica reflexão total) e 0 (ausência de reflexão).

Em relação à SWR, temos:

$$K_r = \frac{\text{SWR} - 1}{\text{SWR} + 1} \quad (7.8)$$

Em relação à carga:

$$K_r = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (7.9)$$

7.3.3 Métodos de casamento de impedâncias

Transformador casador de impedâncias

Realiza o casamento de impedâncias e eleva a tensão da onda portadora. Consequentemente, a corrente de RF diminui, reduzindo a potência dissipada na linha. A figura 7.7 ilustra o casamento por transformador.

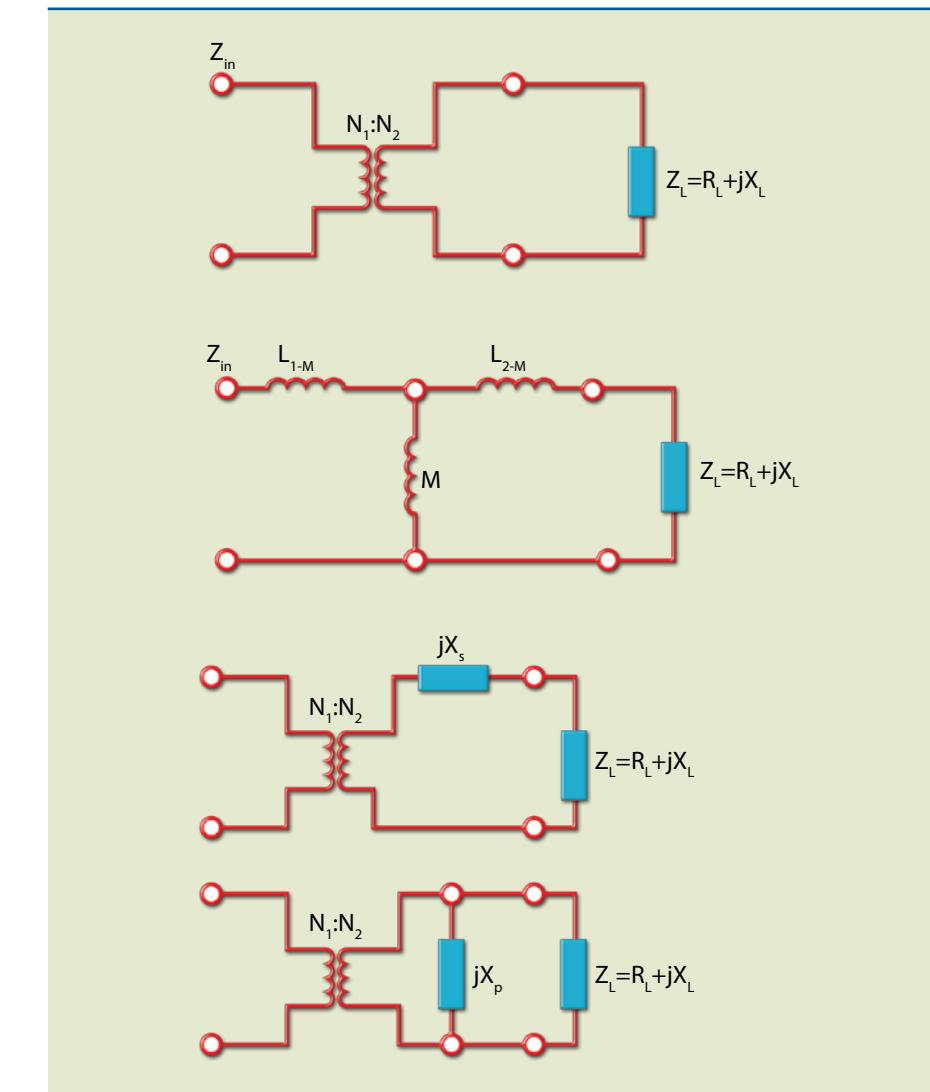


Figura 7.7
Transformador casador de impedâncias.

As relações para o correto casamento utilizando transformador são as seguintes:

$$2\pi f \cdot M \gg |Z_L| \quad (7.10)$$

$$L_1 \cdot L_2 = M^2$$

$$Z_{in} = Z_L \cdot \frac{L_1}{L_2}$$

$$Z_{in} = Z_L \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$$



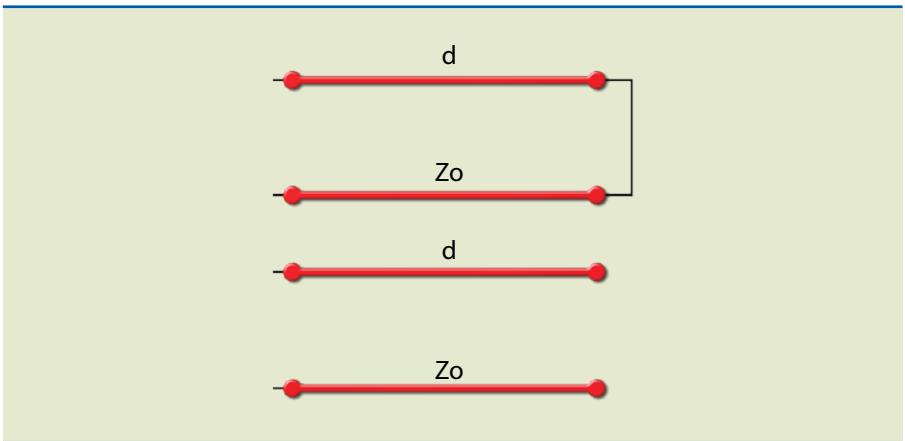
Deve-se fazer o ajuste de X_s para anular a parte imaginária e de N_1/N_2 para igualar a parte real a Z_0 .

Tocos (stubs)

São trechos de linhas de transmissão terminadas em curto-círcito ou em circuito aberto com impedâncias de entrada puramente reativas que são inseridos em determinados pontos da linha (figura 7.8).

Figura 7.8

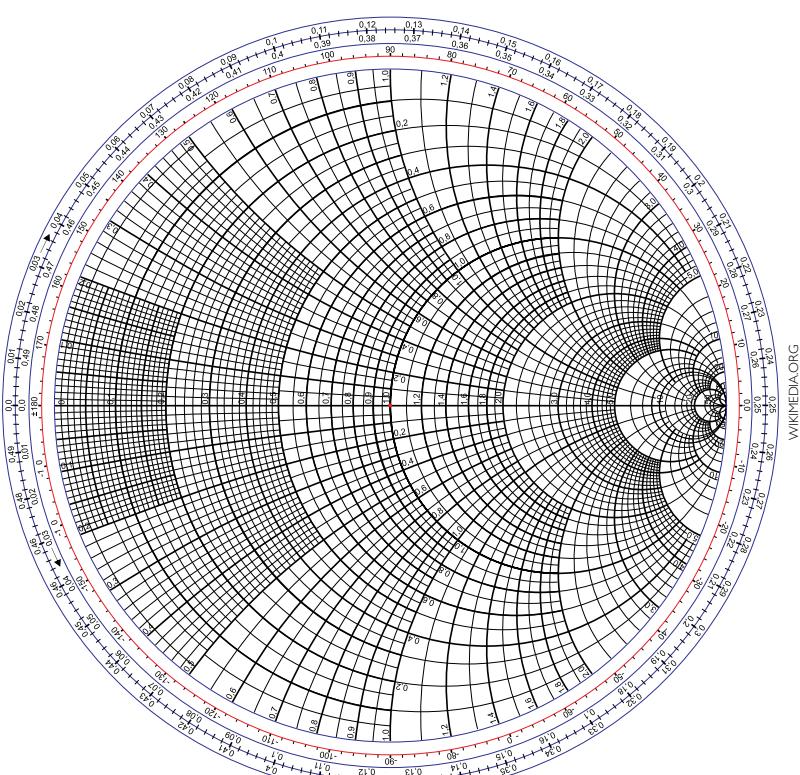
Representação dos tocos na linha de transmissão.



Os tocos podem ser calculados com o auxílio da **carta de Smith** (figura 7.9).

Figura 7.9

Carta de Smith para cálculo de reflexão de sinal.



Capítulo 8

Redes telefônicas

N

o estudo das telecomunicações, um fenômeno bastante observado é a transformação das ondas acústicas (sonoras) em sinais elétricos por meio de equipamentos transceptores.

O som é uma sensação causada no sistema nervoso pela vibração de membranas presentes na orelha, resultado de uma energia transmitida pela vibração de um corpo (diapasão, alto-falante etc.). O som não se propaga no vácuo, requerendo um meio material para se propagar.

As ondas sonoras possuem os seguintes parâmetros, que definem suas características:

- Frequência.
- Amplitude.
- Timbre.

A faixa de frequências audível para a orelha humana é compreendida entre 20 Hz e 20 kHz; o limite superior, onde estão os sons agudos, varia de pessoa para pessoa e decresce com o avanço da idade. Em telefonia, utiliza-se a faixa de 300 a 3 400 Hz, na qual a reprodução da voz é satisfatória, com cerca de 80% de inteligibilidade (percentual de compreensão de palavras em uma conversação) da informação.

A amplitude determina a intensidade do som, de acordo com a potência produzida pela fonte sonora.

O timbre é a característica que distingue os sons de mesma frequência emitidos por diferentes fontes sonoras. Por exemplo, a mesma nota musical tocada por um violão tem timbre diferente da emitida por uma flauta. Outro exemplo é a voz masculina, em geral mais grave do que a feminina.

A voz é uma combinação de sons elementares, os fonemas, representados graficamente por um ou vários símbolos (letras). Quando falamos, os fonemas são formados no aparelho vocal, por meio da passagem do fluxo de ar proveniente dos pulmões. Ao passar pelas cordas vocais, o ar provoca vibrações em uma frequência característica de cada indivíduo, pois depende da tensão nas cordas vocais. A faixa de frequências da voz humana varia de 20 Hz a 10 kHz.



8.1 Sinal de voz em telefonia

Apesar de a voz humana estar compreendida entre 20 Hz e 10 kHz, os sistemas de telefonia limitam a faixa de frequência a 3,4 kHz, na qual a perda de qualidade é tolerável. Nessa faixa está concentrada a maior energia da voz, com índice de inteligibilidade de aproximadamente 80% das palavras.

As figuras 8.1 e 8.2 mostram a curva de resposta para a orelha humana utilizada para definir o canal telefônico.

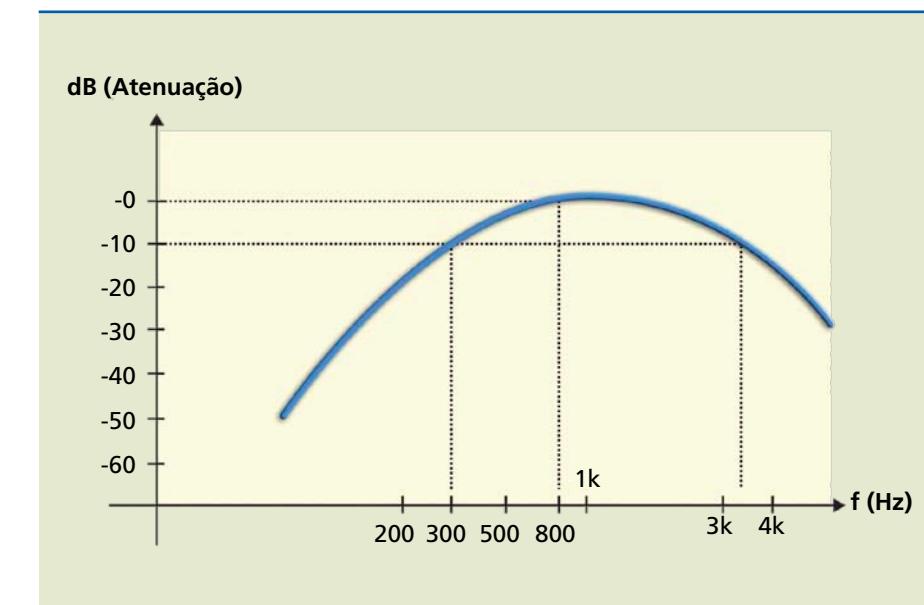


Figura 8.1
Curva de resposta da orelha humana + telefone.

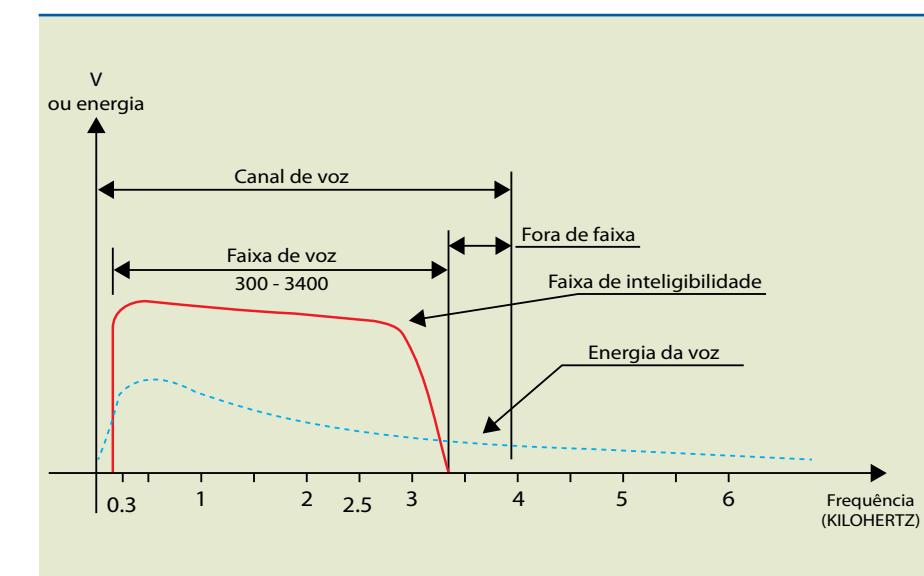


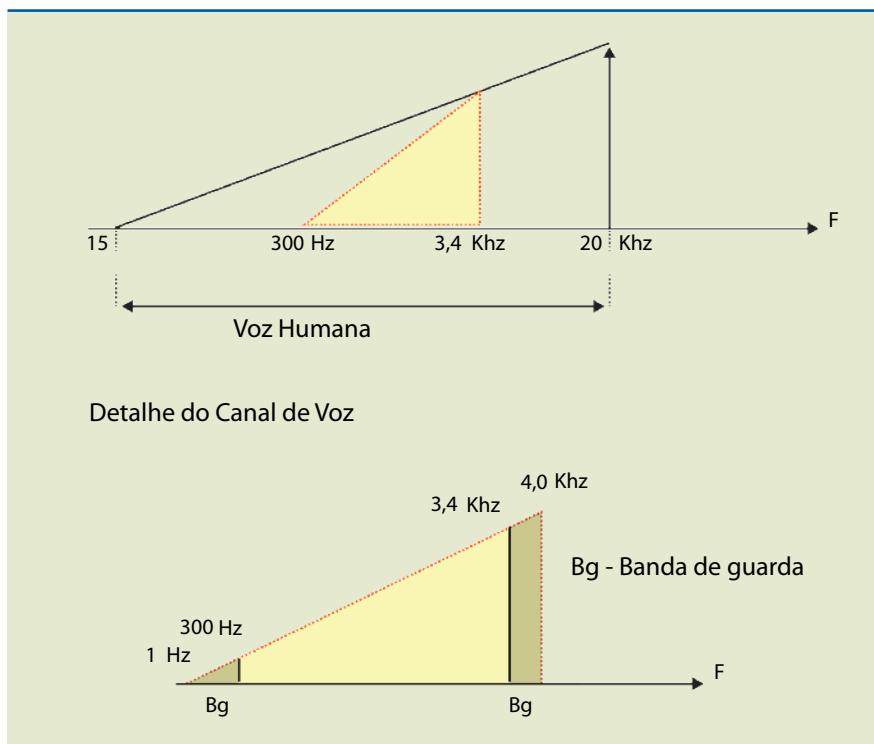
Figura 8.2
Distribuição típica da energia do sinal da voz.

Com base nesses estudos, foi definida a largura de faixa do canal telefônico em 4 kHz (figura 8.3).



Figura 8.3

Canal telefônico.



8.2 Aparelho telefônico

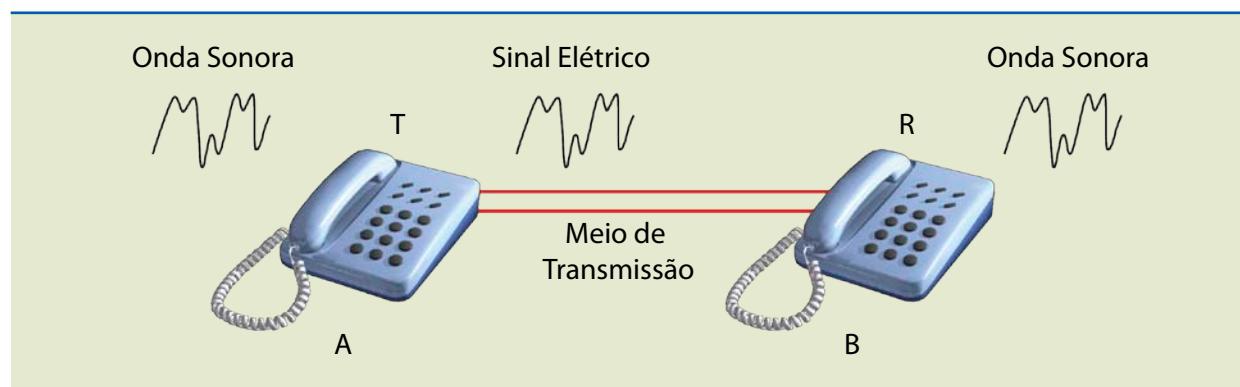
Para que seja transmitida a longas distâncias, a voz tem de ser convertida em sinais elétricos, que percorrem a linha de transmissão até chegar ao destino, onde são convertidos novamente em sinais sonoros, permitindo a troca de informações entre as pessoas que estão se comunicando. Para isso, utiliza-se o aparelho telefônico.

8.2.1 Transdutores

O aparelho telefônico tem dois transdutores: o transmissor ou microfone e a cápsula receptora. A voz emitida por uma pessoa incide sobre o microfone (cápsula transmissora) do telefone A, transformando as ondas sonoras em sinais elétricos. Os sinais elétricos percorrem um par de fios e chegam à cápsula receptora do telefone B, onde são convertidos em ondas sonoras. A figura 8.4 mostra como se processa a ligação telefônica entre pontos.

Figura 8.4

Ligação telefônica entre pontos.



8.2.2 Campainha

Tem a finalidade de alertar o assinante B de que seu aparelho está sendo chamado. Seu acionamento é feito por corrente alternada (corrente de chamada), de baixa frequência (25 Hz), produzida pelas centrais telefônicas.

8.2.3 Híbrida

Tanto o microfone como a cápsula receptora são interligados ao restante do circuito por um par de fios cada um. Entretanto, na transmissão do sinal telefônico, é utilizado apenas um par. Para realizar a interface entre os quatro fios dos transdutores com os dois fios do circuito telefônico, usa-se uma bobina de indução, ou híbrida, que direciona os sinais emitidos pelo microfone do assinante A para o par de fios ligado ao telefone B. O mesmo procedimento é feito no sentido contrário. Na prática, o microfone e o alto-falante mantêm um fio em comum, e cada um deles liga-se ao restante do circuito por outro fio, possibilitando as ligações telefônicas a dois fios (figura 8.5).

Figura 8.5

Ligação telefônica a dois fios.



As outras funções da híbrida são:

- Acoplar a linha com o aparelho telefônico de modo a garantir boa qualidade de transmissão.
- Isolar a cápsula receptora da componente contínua referente à alimentação CC da linha.
- Possibilitar a indução do sinal de voz no secundário, onde se encontra ligada a cápsula receptora.

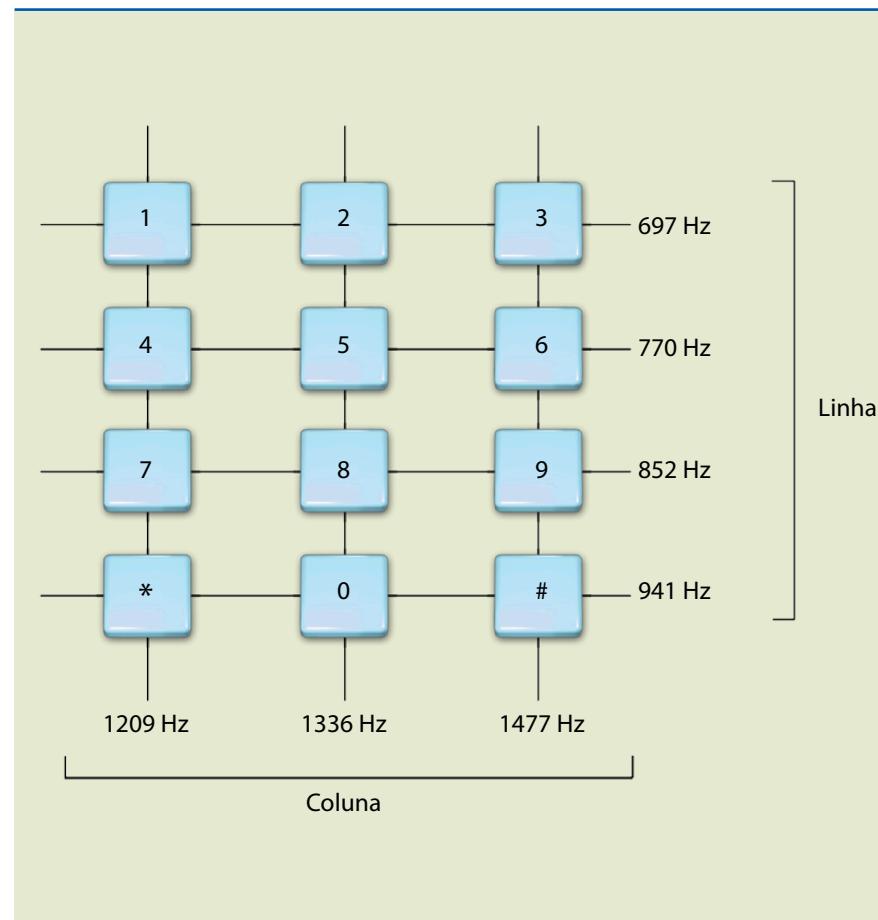
8.2.4 Teclado

Para realizarmos uma chamada, precisamos informar ao sistema telefônico o número do assinante com quem desejamos falar. Para isso, usamos o teclado numérico ou alfanumérico, que pode ser de dois tipos:

a) **Decádico** – Pode ser a disco (telefones antigos) ou de teclas. No decádico a disco, o aparelho envia os dígitos para a central na forma de pulsos, obedecendo à velocidade do disco (10 pulsos por segundo), com espaço interdigital de aproximadamente 100 ms. No modelo de teclas, existem pelo menos 12 teclas: dez numeradas de 0 a 9 e duas auxiliares (# e *). Em sua constituição são alocadas memórias e um dispositivo sequencial a fim de enviar os dígitos para a central na ordem teclada pelo usuário.

b) **DTMF (dual tone multi-frequency) ou multifrequencial** – Cada número é enviado à central telefônica por meio da combinação de duas frequências dentro da banda de voz, denominadas frequência alta e frequência baixa, dispostas em uma matriz (figura 8.6). Cada frequência baixa forma uma linha da matriz, e cada frequência alta, uma coluna. Pela combinação de uma frequência de informações, é possível utilizar até 12 tipos diferentes de informações (dígitos 0 a 9 e símbolos * e #) com apenas sete tons de frequências (quatro frequências baixas e três altas).

Figura 8.6
Representação da combinação de frequências para cada dígito.



8.3 Central e rede telefônicas

Quando imaginamos uma ligação telefônica, a primeira ideia que temos é que os assinantes estão conectados diretamente entre si por um par de fios, conforme ilustra a figura 8.7.

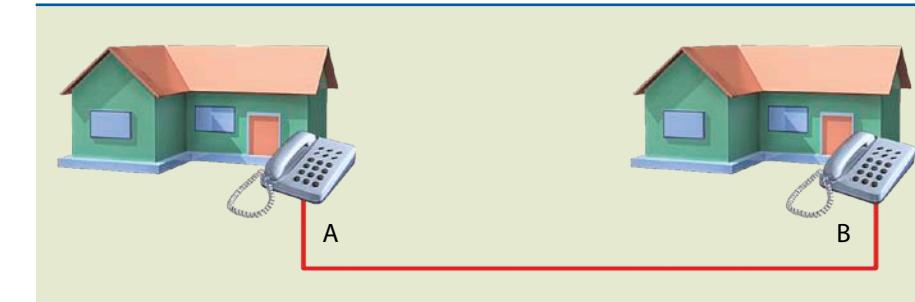


Figura 8.7
Ligação direta hipotética entre assinantes.

Vamos imaginar a situação da figura 8.8, em que seis assinantes estão ligados diretamente.

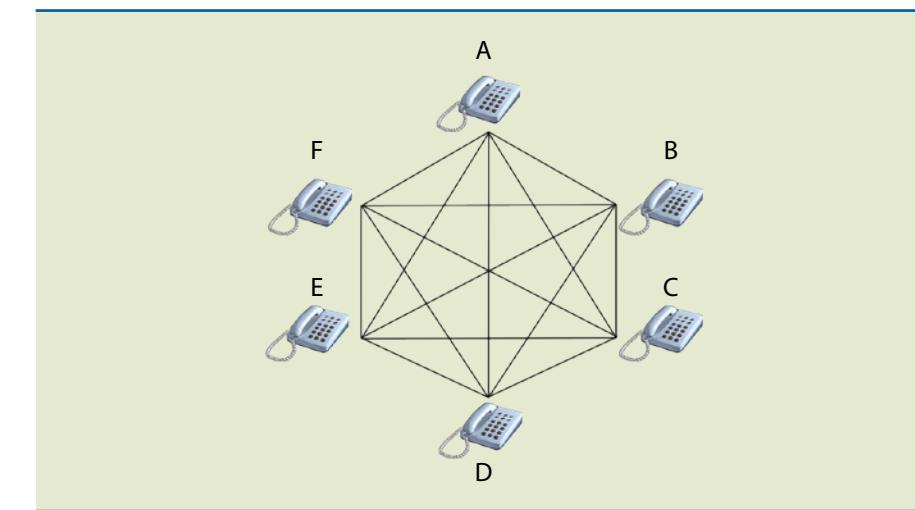


Figura 8.8
Ligação direta hipotética entre seis assinantes.

Para realizar as conexões apresentadas, seriam necessárias 15 ligações dois a dois. Dessa maneira, podemos notar que, conforme aumenta o número de assinantes, o sistema fica mais complexo, tornando inviável a interligação direta de todos os assinantes.

A relação do número de pares pode ser determinada por:

$$N = \frac{n \cdot (n - 1)}{2} \quad (8.1)$$

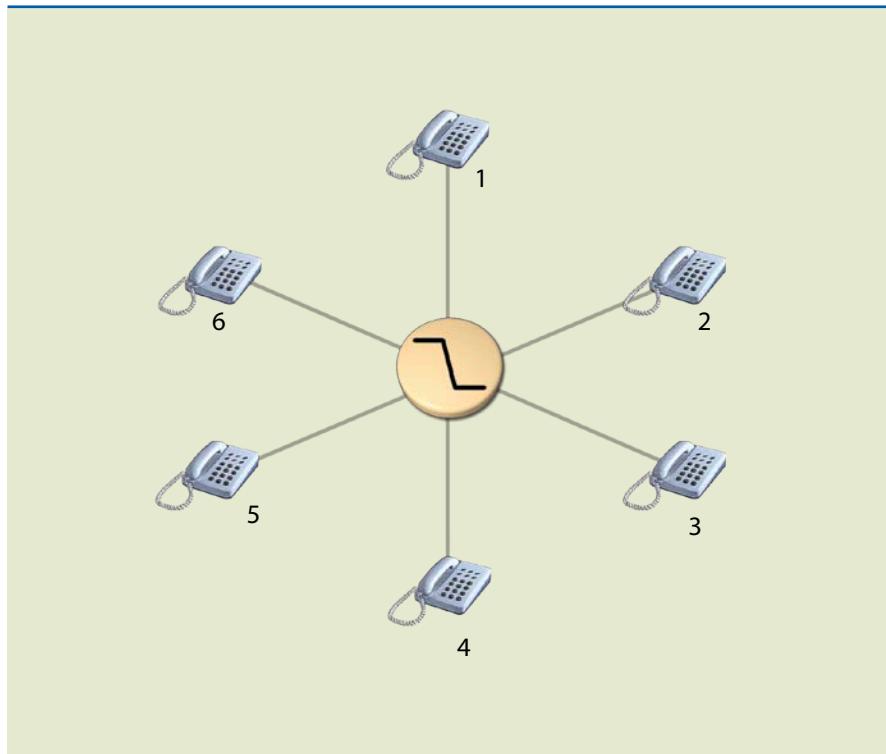
em que:

- N é o número de pares;
- n, o número de assinantes.

Assim, se, em um sistema com 1 000 assinantes, desejássemos interligá-los diretamente, precisaríamos de 499 500 pares. A solução encontrada foi centralizar os pares de assinantes e desenvolver um sistema capaz de realizar a comutação entre todos, ou seja, controlar e prover a interligação dos aparelhos telefônicos, dois a dois. Esse sistema é chamado de **central telefônica** (figura 8.9).

Figura 8.9

Assinantes ligados a uma central de comutação.



Até o início da década de 1920, a comutação entre as chamadas telefônicas era realizada pela telefonista, que utilizava cordões em uma mesa operadora para fazer a conexão entre os assinantes. Portanto, naquela época, a central era formada por dois elementos básicos:

- **Mesa:** comutação física dos assinantes.
- **Telefonista:** funções de controle da chamada (inteligência).

Com a automatização, o cargo de telefonista foi eliminado e surgiram as centrais automáticas analógicas, capazes de interpretar os algarismos enviados pelo decádico e estabelecer a ligação entre os assinantes da rede. Dois exemplos são as centrais passo a passo e a crossbar.

Atualmente a comutação é feita por centrais digitais com controle por programa armazenado (CPA), de forma temporal ou espacial.

As funções gerais de uma central telefônica são:

- **Atendimento** – Recepção do pedido de serviço de um aparelho telefônico ou de uma central (origem de uma chamada telefônica).

- **Recepção de dígitos** – Recepção do número do assinante chamado.
- **Interpretação** – Análise do número recebido para determinar providências a tomar.
- **Seleção de caminhos internos** – Seleção de um canal ou *time slot (link)* ou um conjunto de canais ou *time slots* na matriz de comutação.
- **Estabelecimento de caminho** – Controle dos elementos da matriz de comutação para estabelecer um canal físico para determinada chamada telefônica.
- **Alerta** – Sinais de campainha aos usuários: chamado e chamador.
- **Supervisão** – Monitoração do chamador e do chamado para, logo após o término da ligação, desconectar e liberar o canal.
- **Transmissão da informação** – Caso o telefone chamado esteja em outra central, são transmitidas informações de término da ligação para essa.

Uma central é composta basicamente por dois sistemas (figura 8.10):

- **Sistema de comutação** – Realiza as conexões entre assinantes e/ou centrais, por meio de relés ou circuitos de comutação digital, e a sinalização entre assinantes e central e entre centrais.
- **Sistema de controle** – É a parte inteligente da comutação. Controla o sistema de comutação para que realize as conexões e envie as sinalizações corretamente.

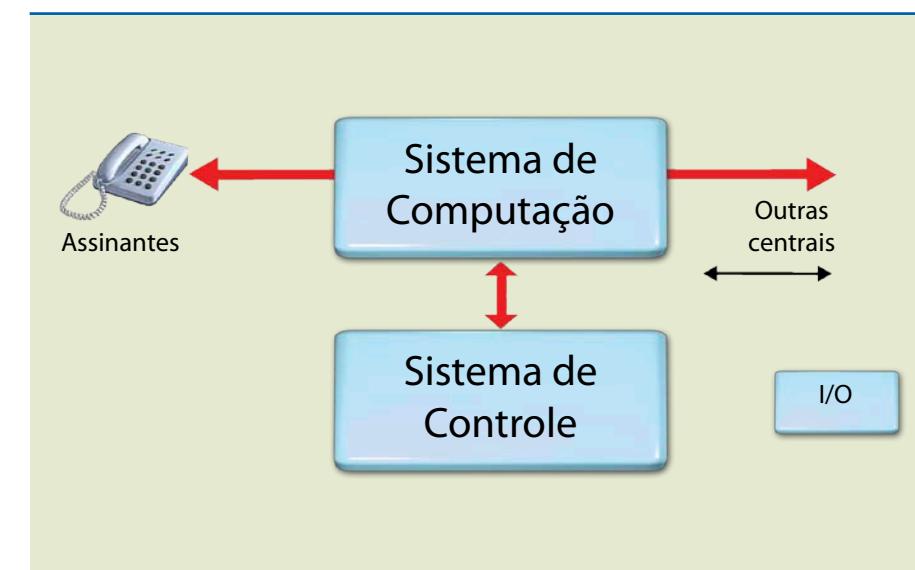


Figura 8.10

Sistemas de comutação e controle de uma central telefônica.

As centrais telefônicas são classificadas de acordo com sua função na rede telefônica, interligando assinantes ou centrais para provimento de chamadas interurbanas ou internacionais:

- **Central local** – Interliga assinantes de determinada área geográfica.
- **Central trânsito** – Divide-se em:
 - **Central trânsito internacional** – Realiza o encaminhamento de chamadas internacionais.



- **Central trânsito classe I** – Central trânsito interurbana que se interliga com, pelo menos, uma central de trânsito internacional por meio de rota final.
- **Central trânsito classe II** – Central trânsito interurbana que se interliga com uma central trânsito classe I por meio de rota final.
- Central trânsito classe III.
- Central trânsito classe IV.
- **Central Tandem** – Faz a interligação entre centrais locais dentro de determinada região.

Essa classificação respeita uma hierarquia, conforme mostra a figura 8.11.

Figura 8.11

Hierarquia de centrais telefônicas.



Essas centrais são denominadas centrais públicas de comutação. Existem também as centrais privadas, destinadas a empresas que necessitam de ramais telefônicos. Entre as centrais privadas destaca-se o **PABX** (*private automatic branch exchange*), que concentra ramais com recursos de controle (busca automática, tarifação etc.) e pode fornecer até 25 000 portas, configuráveis para ramais, troncos, tarifador de chamadas etc. (figura 8.12).

Outro tipo de centrais privadas são as KS, centrais de pequeno porte que concentram até 24 ramais com baixa capacidade de controle.

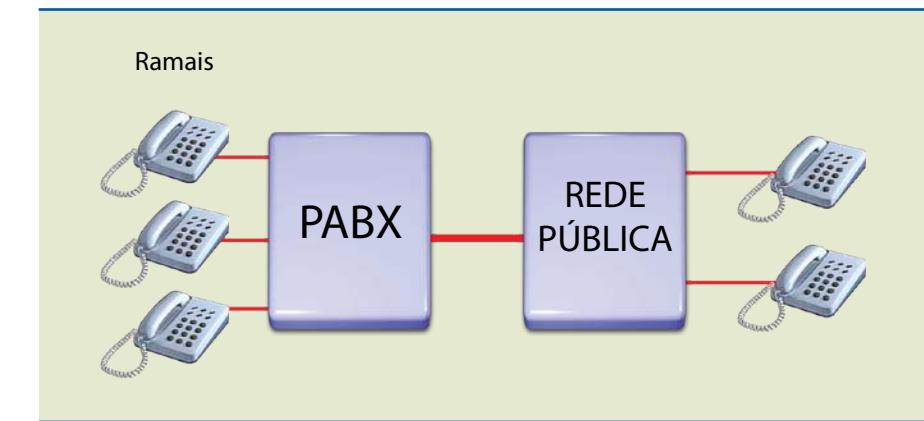


Figura 8.12

Ligação do PABX com a rede pública.

As **centrais digitais** controlam as chamadas telefônicas e os serviços utilizados pelos assinantes por meio de sistemas computacionais com controle por programa armazenado (CPA), responsáveis pela gerência de todas as tarefas exercidas pela central. Esse recurso possibilitou a implantação de novos serviços aos assinantes de telefonia, como chamada em espera, despertador, caixa postal etc. Entre as funções de controle CPA destacam-se:

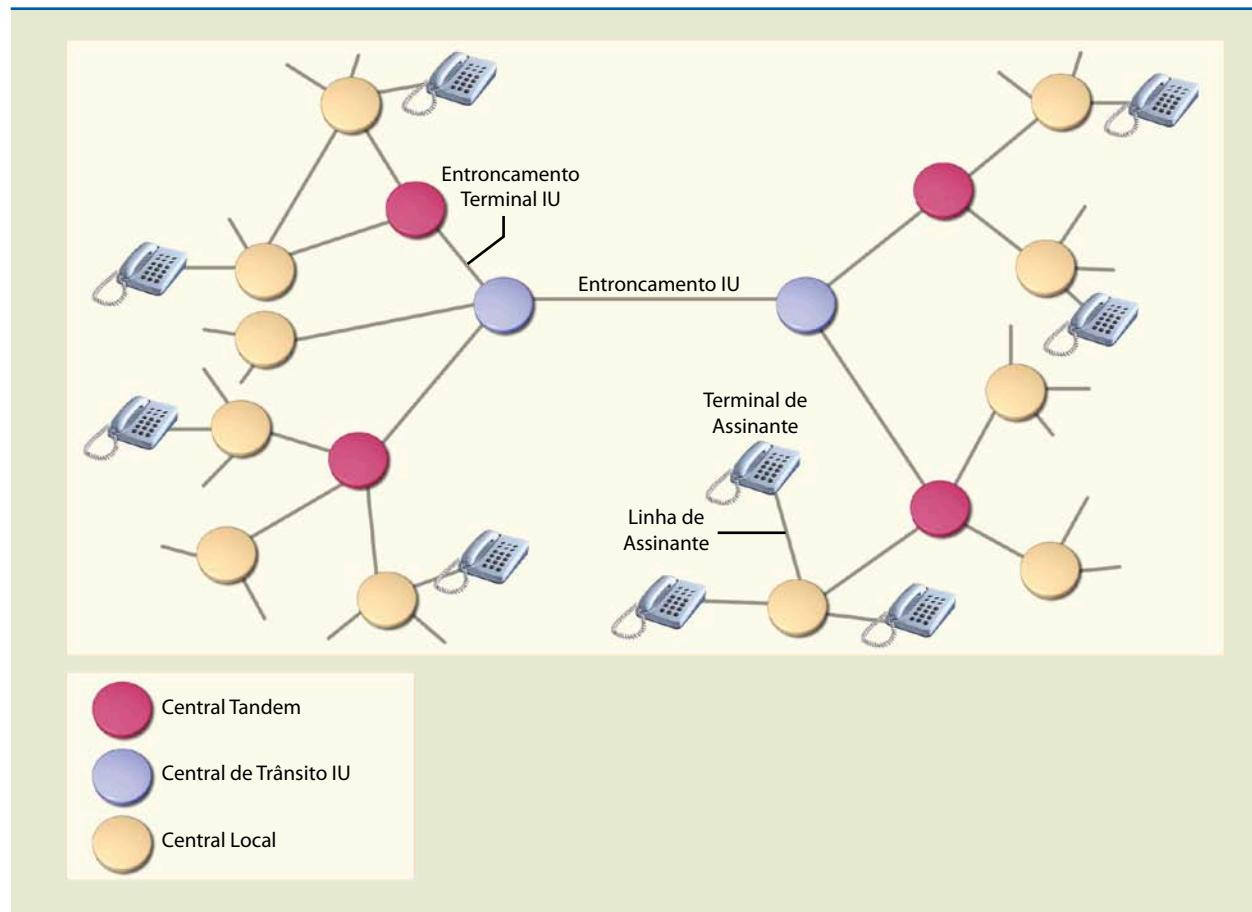
- Gerenciamento de todo o procedimento de chamada.
- Gerenciamento de tráfego telefônico.
- Tarifação.
- Gerenciamento de falhas.
- Testes no sistema.

A central CPA realiza a comutação dos assinantes de forma digital. Para tanto, informações de chamadas telefônicas originadas de vários terminais precisam ser tratadas, ou seja, digitalizadas. Tais informações devem ser multiplexadas no tempo, antes de entrarem na rede de comutação. Dessa maneira, são obtidos conjuntos de vias padronizadas, provenientes das multiplexações dos vários canais de comunicação.

8.4 Estrutura da rede telefônica

Os terminais dos assinantes são interligados a uma central telefônica por uma grande rede de fios e cabos, composta por:

- **Rede de longa distância** – Centrais interurbanas e internacionais e respectivos entroncamentos.
- **Rede local** – Centrais e entroncamentos em área urbana e enlace (rede) de assinantes (constituído pelos terminais e linhas de assinantes).
- **Rede de assinante** – Redes de alimentação (primária) e de distribuição (secundária).
- Com estrutura complexa e de grande capilaridade, a rede telefônica evoluiu do serviço telefônico básico para um sistema capaz de fornecer serviços de transmissão de dados, telefonia, telex, comunicação móvel, acesso à internet e transmissão de vídeo. A figura 8.13 mostra a estrutura topológica da rede telefônica, com os diferentes tipos de centrais telefônicas.

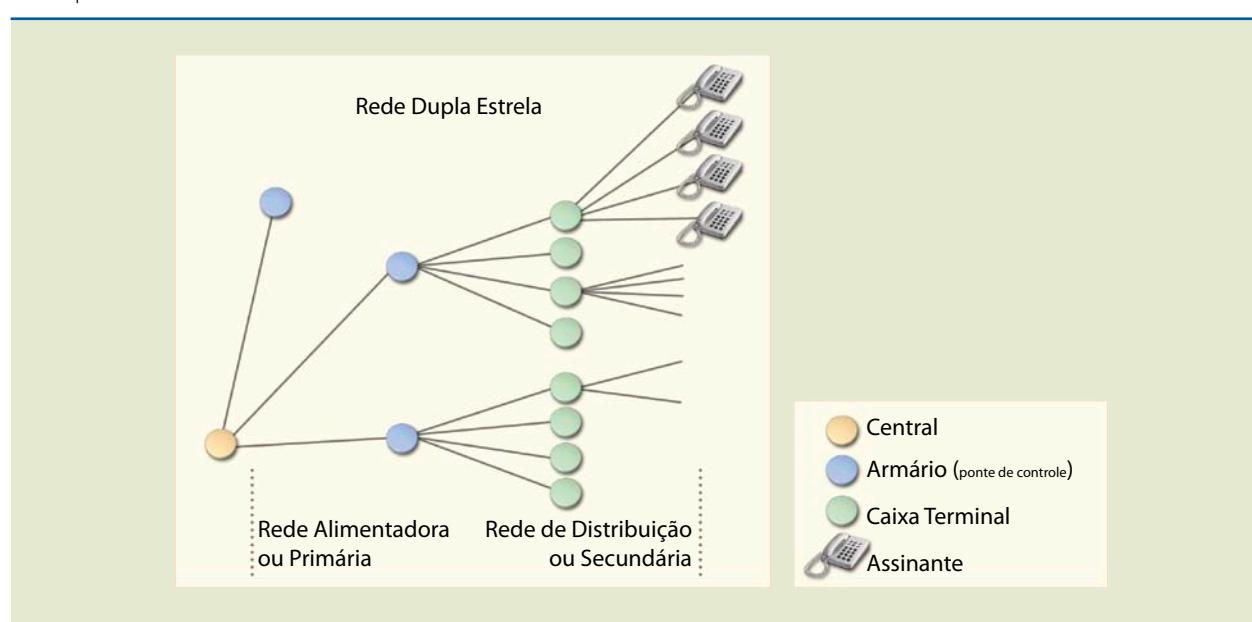
**Figura 8.13**

Arquitetura da rede de telefonia.

A rede local, responsável por conectar os assinantes de uma região à central telefônica, é formada pelas redes primária e secundária (figura 8.14).

Figura 8.14

Arquitetura da rede local.



8.5 Tarifação

É o processo de cobrança dos assinantes pelos serviços prestados por uma concessionária. Alguns fatores, chamados dados de tarifação, são levados em consideração para realizar a tarifação em uma conexão telefônica:

- Duração da chamada.
- Distância entre os assinantes.
- Tipo de assinante.

No processo de tarifação, o sistema de comutação cria um registro de dados de tarifação para cada chamada. Esses dados são armazenados e, quando atingem certo nível ou determinado período, transferidos para um centro de tarifação, que calcula a conta dos assinantes. Além do número do destino e da duração, outras condições influenciam a tarifação da chamada:

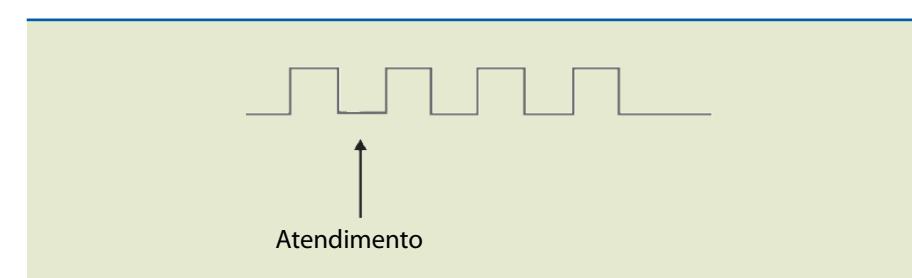
- **Classe de originação** – Indica que o assinante deve ser tarifado pela chamada. Normalmente, a chamada é cobrada do assinante chamador. Entretanto, em alguns casos, é cobrada do assinante chamado.
- **Índice de bilhetagem da mensagem** – Atribuído para cada destino de chamada.
- **Data e hora** – O valor da tarifa varia sazonalmente com o horário e o dia.
- **Número de serviços especiais** – Chamada para serviços disponíveis ao assinante, como auxílio à lista telefônica.

Os **métodos de tarifação** determinam como o sistema de comutação registra os dados de tarifação e podem ser: tarifação por multimedicação e tarifação por bilhetagem automática.

8.5.1 Tarifação por multimedicação

Cada assinante conectado a uma central possui um “contador” associado, que é incrementado toda vez que se estabelece uma chamada. A incrementação do contador ocorre com a geração de pulsos de tarifação, cujo período varia de acordo com o tempo de ligação, a distância entre os assinantes chamado e chamador e a hora da chamada. Essa variação tem o nome de degrau tarifário. Existem três tipos de pulsos por multimedicação:

- **Karlson puro (KP)** – A partir do atendimento, em certo instante aleatório $t < T$, é enviado o primeiro pulso ao assinante e progressivamente é enviado mais um pulso a cada intervalo de tempo T (figura 8.15).

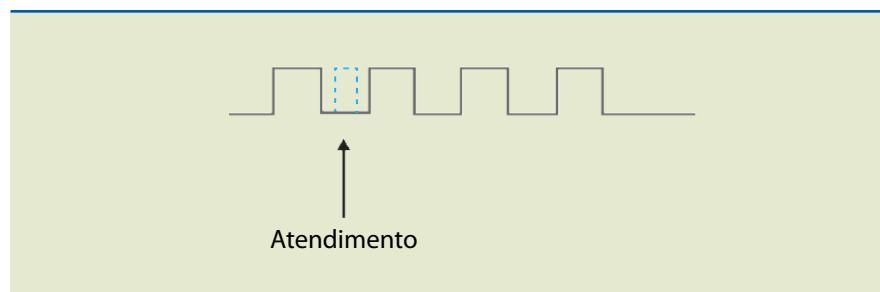
**Figura 8.15**

Representação do pulso KP.

- Karlson acrescido (KA)** – No instante do atendimento, é enviado um pulso aleatório ao assinante. O próximo pulso da sequência é enviado normalmente ao contador do assinante (figura 8.16).

Figura 8.16

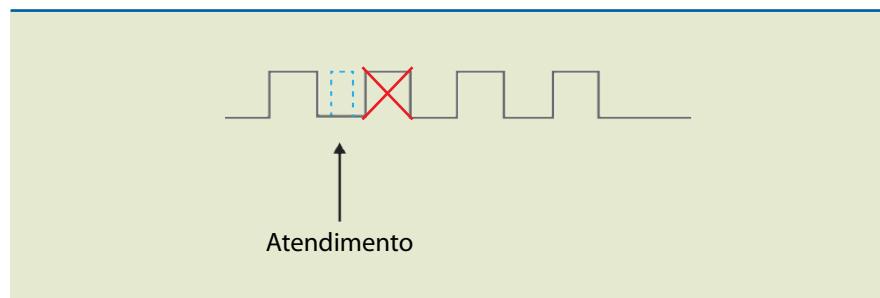
Representação do pulso KA.



- Karlson modificado (KM)** – No instante do atendimento, é enviado um pulso ao contador do assinante. O próximo pulso da sequência é anulado e somente a partir do segundo pulso há incrementação do contador do assinante (figura 8.17).

Figura 8.17

Representação do pulso KM.



Atualmente, é aplicada a técnica KA.

8.5.2 Tarifação por bilhetagem automática

Nesse método, o sistema de comutação coleta informações detalhadas por chamada no formato de bilhete AMA (*automatic message account*). O bilhete AMA possui as seguintes informações:

- Número do assinante de origem.
- Número do assinante de destino.
- Duração da conversação (horas, minutos e segundos).
- Data (dia, mês e hora).
- Essas informações são interpretadas com base no código nacional dos assinantes e prefixo das centrais, possibilitando estimar a distância por meio do degrau tarifário e efetuar o cálculo da tarifação.

Em sistema de comutação, o responsável pela elaboração do bilhete AMA é o bilhetador automático, cuja principal função é gerenciar os dados detalhados de tarifação, bem como indicar os dispositivos de gravação ou a codificação adequada.

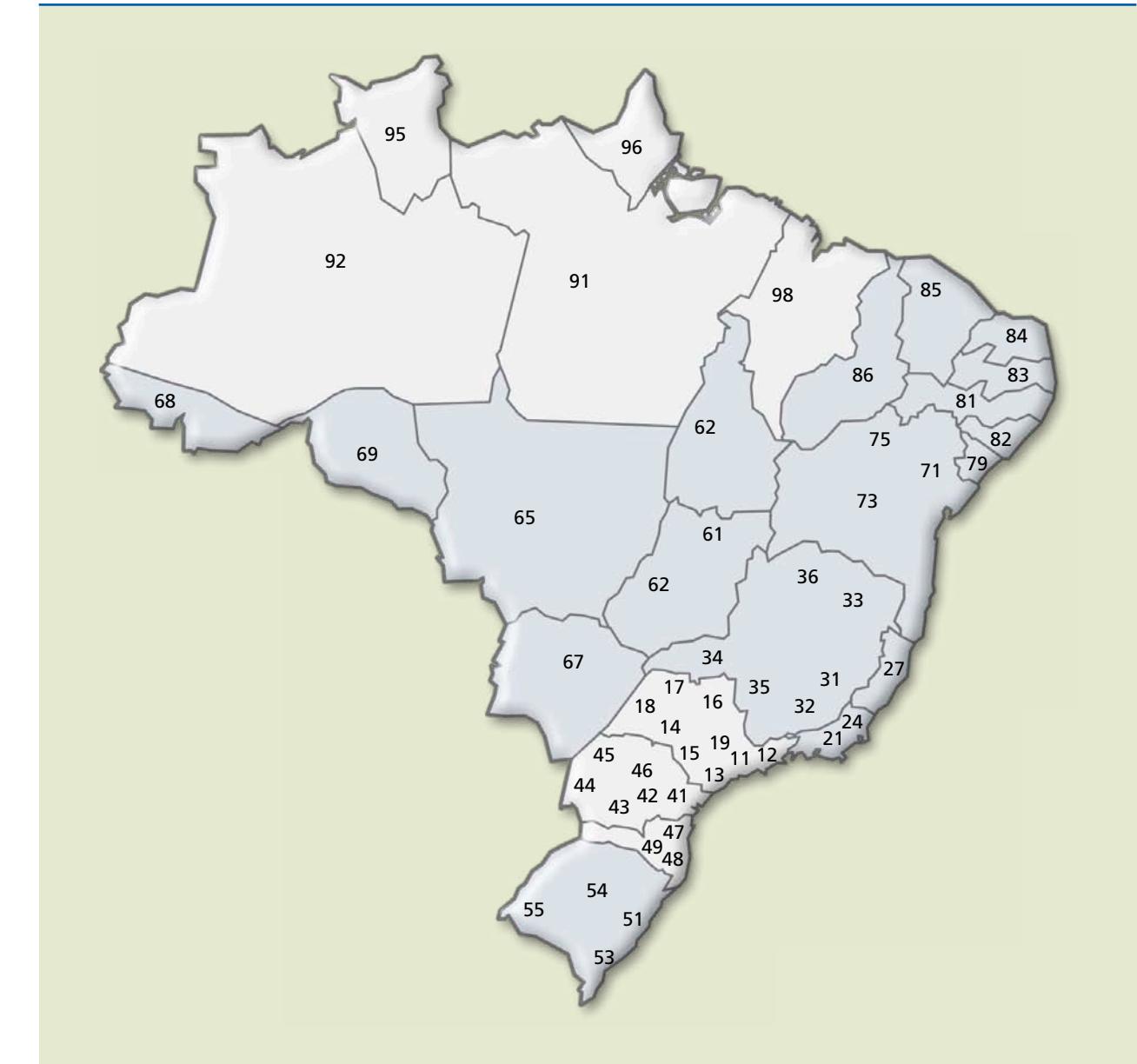
8.6 Plano de numeração

Criado para identificação e acesso de um assinante na rede de telefonia pública por meio de um código numérico único, é classificado em plano de numeração nacional e plano de numeração internacional.

- O **plano de numeração nacional** divide nosso país em nove regiões, de 1 a 9, cada uma das composta por um ou mais estados, abrangendo diferentes áreas numéricas (figura 8.18).

Figura 8.18

Regiões e áreas numéricas em telefonia.

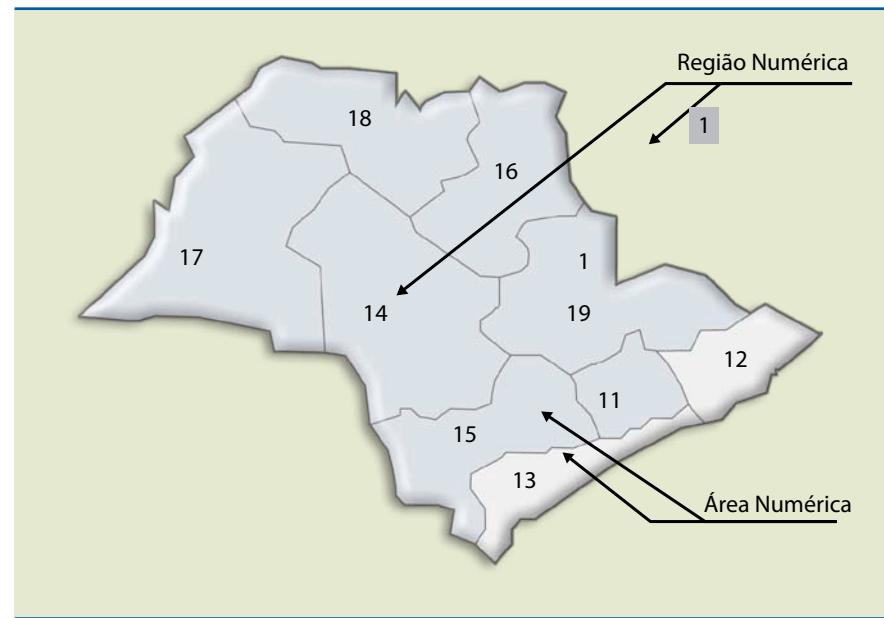


Cada área numérica é identificada por um dígito, não repetitivo, dentro de uma região numérica. A figura 8.19 apresenta a região numérica 1, constituída pelo Estado de São Paulo, com as respectivas áreas numéricas.



Figura 8.19

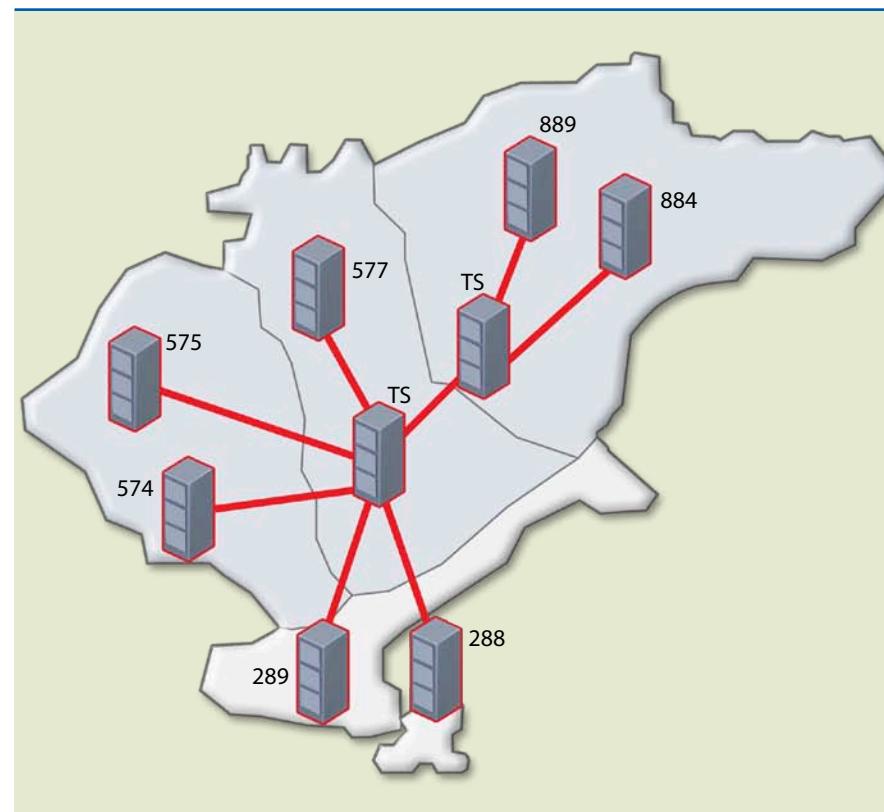
Região numérica 1 e respectivas áreas numéricas.



As áreas numéricas são formadas por centrais telefônicas, que fazem parte da rede de telefonia pública nacional. Elas também recebem uma identificação numérica, de três ou quatro dígitos, denominada prefixo da central. O primeiro algarismo do prefixo (o mais significativo) deve ser diferente de 0 e 1, pois estes são utilizados para outras finalidades. O prefixo não se repete dentro de uma área numérica. A figura 8.20 ilustra as centrais dentro da área numérica 12.

Figura 8.20

Centrais localizadas na área numérica 12.



Os assinantes de uma central local são identificados por números, que podem possuir sete ou oito dígitos, com a seguinte formação:

- Numeração com sete dígitos: **ABC-MCDU**.
- Numeração com oito dígitos: **ABCD-MCDU**.

ABC e **ABCD** representam o prefixo da central; **MCDU**, milhar, centena, dezena e unidade.

Por exemplo, um assinante localizado na cidade de Santos (São Paulo) será assim identificado no plano nacional:

13 232-9214

13 indica o código de área (região numérica **1**, área numérica **3**); **232-9214**, o número do assinante (prefixo da central **232**, assinante **9214**).

No **plano de numeração internacional**, cada país integrado à rede mundial tem um código internacional próprio, formado por um, dois ou três dígitos. A numeração internacional é dividida em regiões de numerações correspondentes aos continentes. A tabela 8.1 apresenta alguns exemplos de códigos internacionais.

País	Código
Estados Unidos	1
Alemanha	49
México	52
Suécia	46
Brasil	55
Holanda	31
Japão	81

Fonte:www.teleco.com.br

Tabela 8.1
Exemplos de códigos internacionais.

Por exemplo, um assinante localizado em Belo Horizonte (Minas Gerais) será identificado no plano internacional como:

55 31 4640-3320

55 indica o código do país (Brasil); **31**, o código de área (região numérica **3**, área numérica **1**); **4640-3320**, o número do assinante (prefixo da central **4640**, assinante **3320**).

Os **códigos de serviços especiais** são números iniciados por 0 e 1 não atribuídos aos assinantes. O algarismo 0 discrimina o fluxo de tráfego que se destina



para fora da área numérica (tráfego nacional e internacional) e o 1, os códigos especiais, que, segundo o CCITT (Comitê Consultivo de Telefonia e Telegrafia Internacional), devem ser compostos por três dígitos (1XY).

O objetivo dos códigos especiais é proporcionar o acesso aos serviços e às informações de utilidade pública, designados por números curtos e de fácil memorização. Alguns serviços são gratuitos e outros tarifados. Exemplos no Brasil:

a) Serviços especiais da operadora:

- 102: informações.
- 103: reclamações.
- 104: solicitação de serviços.

b) Serviços de utilidade pública tarifados:

- 130: hora certa.
- 134: despertador.
- 136: farmácias de plantão.

c) Serviços de emergência gratuitos:

- 190: polícia.
- 192: atendimento móvel de urgência.
- 193: bombeiros.
- 199: defesa civil.

As chamadas são classificadas em:

- **Chamada local** – Ocorre dentro de uma área numérica.
- **Chamada de longa distância (DDD)** – Ocorre entre áreas numéricas, dentro do mesmo país. O assinante chamador deve discar o prefixo nacional 0 antes da identificação de destino, indicando à central que a chamada é para fora da sua área.
- **Chamada internacional (DDI)** – Ocorre entre países. O assinante chamador deve discar o prefixo internacional 00 antes da identificação de destino, indicando à central que a chamada é para fora do país.

Para possibilitar a escolha da operadora de serviço de telefonia, a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) designou um código de acesso para cada operadora. Utilizado em chamadas de longa distância e internacionais, o código de acesso deve ser discado depois do prefixo nacional 0 (DDD) ou internacional 00 (DDI). Exemplo de chamada DDD:

0XX81 295-3425

0 indica o prefixo nacional; **XX**, o código de acesso da operadora da região; **81**, o código de área (região numérica **8**, área numérica **1**); **295-3425**, o número do assinante (prefixo da central **295**, assinante **3425**).

8.7 Sinalização telefônica

O objetivo da sinalização é fornecer às centrais envolvidas em uma chamada as informações necessárias para estabelecer a conexão, podendo ser:

- entre terminais e central: aparelhos telefônicos públicos ou privados, equipamentos CPCT ou PABX;
- entre centrais.

Há dois tipos de sinalização entre assinantes e centrais:

- Sinalização de assinante: discagem decádica, discagem multifrequencial.
- Sinalização acústica: tons diversos, campainhas.

Também há dois tipos de sinalização entre centrais – por exemplo, para chamadas interurbanas:

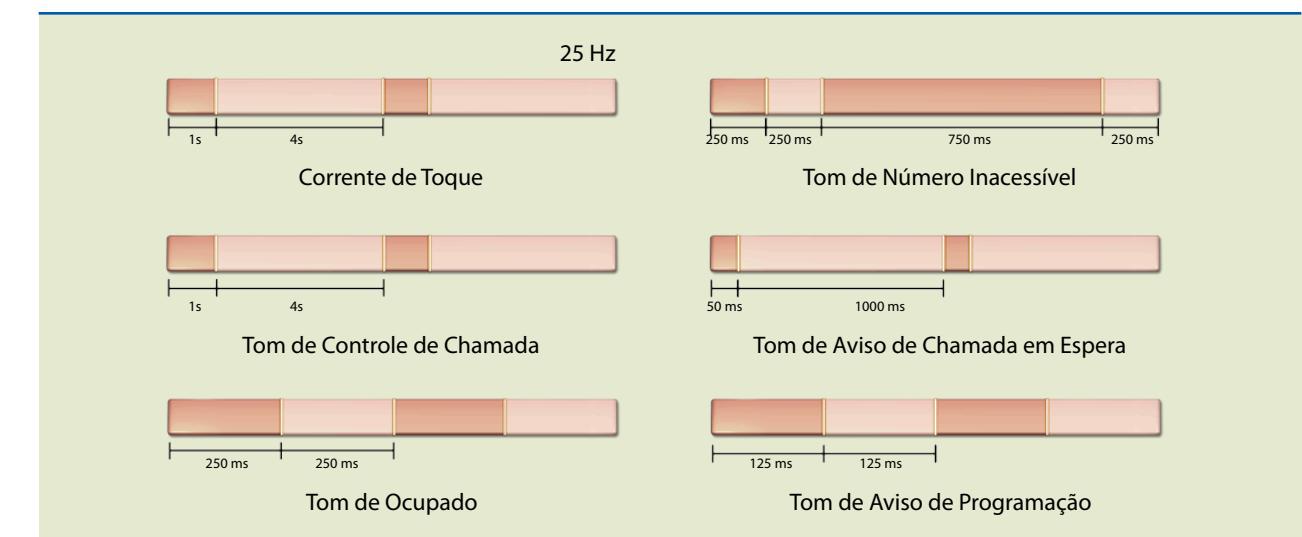
- Associada a canal: sinalização de linha e de registro.
- Sinalização por canal comum SS#7.

8.7.1 Sinalização acústica

Tem a finalidade de emitir indicações aos assinantes sobre a conexão efetuada ou a ser efetuada (figura 8.21). Exemplos:

- **Tom de discar** – Sinal contínuo para avisar ao assinante que ele pode iniciar a discagem do número.
- **Corrente de toque** – Sinal emitido para avisar ao assinante, pelo acionamento da campainha, que há uma chamada para ele.
- **Tom de controle de chamada** – Indica que a conexão foi completada e que o assinante B está sendo chamado.
- **Tom de ocupado** – Indica assinante ocupado, congestionamento, defeito ou acesso negado.

Figura 8.21
Características dos tons de sinalização acústica.



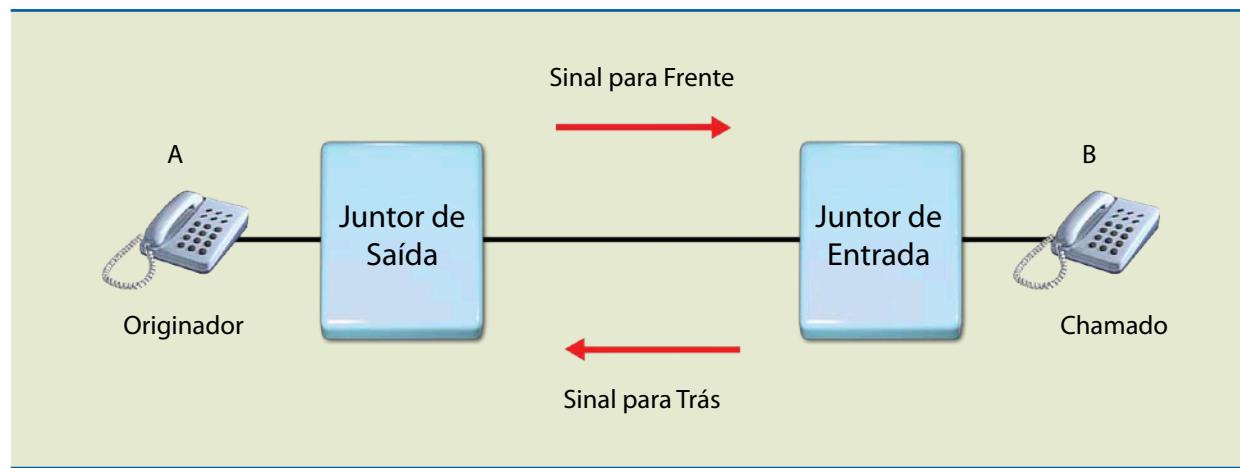
8.7.2 Sinalização de linha

É a que estabelece a comunicação entre centrais nas linhas de junções (juntores), agindo durante toda a conexão (figura 8.22). Envolve trocas de informações relacionadas com os estágios da conexão e supervisão da linha de junção:

- Inicia os procedimentos de ocupação e liberação de juntor.
- Informa a colocação e a retirada de fone no gancho do assinante (chamado para fins de tarifação).
- Ocorre em todas as fases da chamada.

Figura 8.22

Ligaçāo de centrais com juntores.



8.7.3 Tipos de sinais de linha

Diferentes tipos de sinais de linha são trocados entre os juntores; cada sinal tem um significado e aplicação.

Sinais para frente são aqueles em que a sinalização ocorre no sentido do assinante chamador (A) para o chamado (B). Nessa situação, ocorrem os seguintes sinais de linha:

- Ocupação.
- Confirmação de ocupação.
- Rechamada.
- Desligar para frente ou desconexão.

Sinais para trás ocorrem no sentido oposto:

- Atendimento.
- Confirmação de desconexão.
- Desconexão forçada.
- Desligar para trás.
- Bloqueio.
- Tarifação.
- Falha.

8.7.4 Protocolos de sinalização de linha

Há quatro tipos de protocolo:

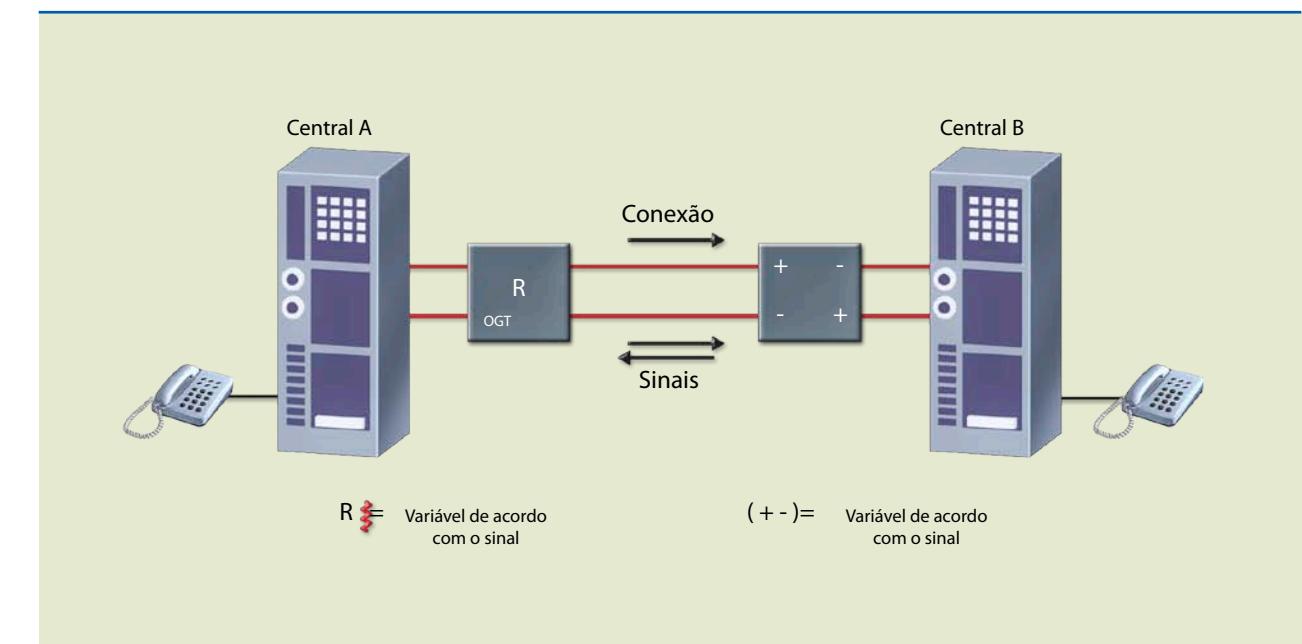
- Corrente contínua.
- E&M pulsada.
- E + M contínua.
- R2 digital.

Sinalização de linha por corrente contínua ou loop

É utilizada entre juntores interligados a dois fios para conexão entre centrais a curta distância. Os diversos sinais são representados por presença de corrente elétrica com intensidade e sentido que variam de acordo com o tipo de sinal ou ainda pela completa ausência de sinais.

A figura 8.23 apresenta a sinalização de linha por corrente contínua entre duas centrais eletromecânicas (XB).

Figura 8.23
Sinalização de linha por corrente contínua.



Sinalização E&M pulsada

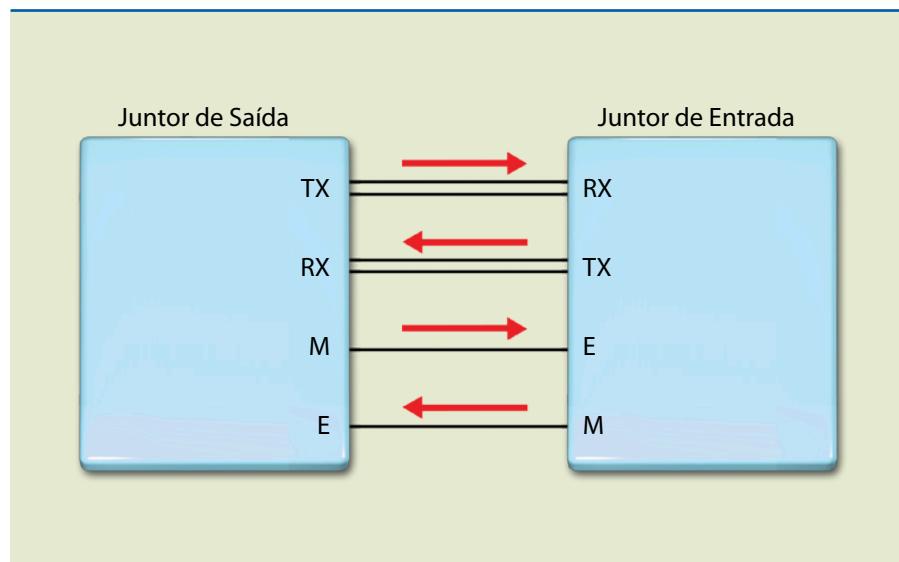
É utilizada entre centrais interligadas a longa distância por sistema de multiplexação e transmissão, devido à inviabilidade econômica da interligação a dois fios.

Nos sistemas analógicos (figura 8.24), empregam-se juntores a seis ou sete fios, quatro deles para conversação – dois para Tx e dois para Rx – e dois para sinalização de linha – um transmite os sinais de linha (fio M) e o outro os recebe (fio E).

Em centrais CPA, os circuitos que atendem a esse tipo de sinalização utilizam dois canais para conversação – um para Tx e um para Rx – e um para sinalização de linha, que envia e recebe a sinalização de até 30 canais de voz.

Figura 8.24

Juntores em sistemas analógicos.



A tabela 8.2 apresenta a codificação de linha nessa sinalização.

Tabela 8.2

2: Codificação E&M pulsada.

Sinal	Duração dos pulsos	Sentido
Ocupação Atendimento	Curta Curta	Para frente Para trás
Desligar para trás Desligar para frente	Longa Longa	Para trás Para frente
Confirmação de desconexão	Longa	Para trás
Desconexão forçada	Longa	Para trás
Bloqueio	Permanente	Para trás
Tarifação Rechamada	Curta Curta	Para trás Para frente

Curta duração: 150 ms ± 30 ms; longa duração: 600 ms ± 120 ms.

Sinalização R2 digital

Consiste na utilização de dois bits de sinalização para frente (af e bf) e dois bits de sinalização para trás (ab e bb). Esses bits são usados na troca de informações entre os juntadores com enlace PCM e transmitidos por um intervalo, chamado intervalo de sinalização (IT 16).

A tabela 8.3 apresenta a sinalização R2 digital.

DESIGNAÇÃO DO SINAL	SENTIDO DO SINAL	BITS DE SINALIZAÇÃO	OBSERVAÇÃO			
			af	bf	ab	bb
Tronco livre			I	0	I	0
Ocupação de tronco	Ocupação	→	0	0	I	0
	Confirmação de ocupação	←	0	0	I	I
Chamada em progresso			0	0	I	I
Atendimento de chamada	Sinal de atendimento	←	0	0	0	I
Conversação			0	0	0	I
Tarifação	Sinal de tarifação	←	0	0	I	I
Desligamento de chamada	Sinal de desligar para trás	←	0	0	I	I
	Sinal de desligar para frente	→	I	0	X	I
	Sinal de confirmação de desconexão	←	I	0	I	I
	Sinal de desconexão forçada	←	0	0	0	0
Situações	Confirmação de desconexão forçada	→	I	0	I	I
Especiais	Sinal de bloqueio	←	I	0	I	I
	Sinal de falha	→	I	I	I	0

Fonte: www.teleco.com.br

Tabela 8.3

Sinalização R2 digital.

8.7.5 Sinalização de registro

É responsável pela troca de informações sobre os assinantes entre órgãos de controle das centrais, por exemplo: número, tipo, condições etc. As informações trocadas pela sinalização de registro são:



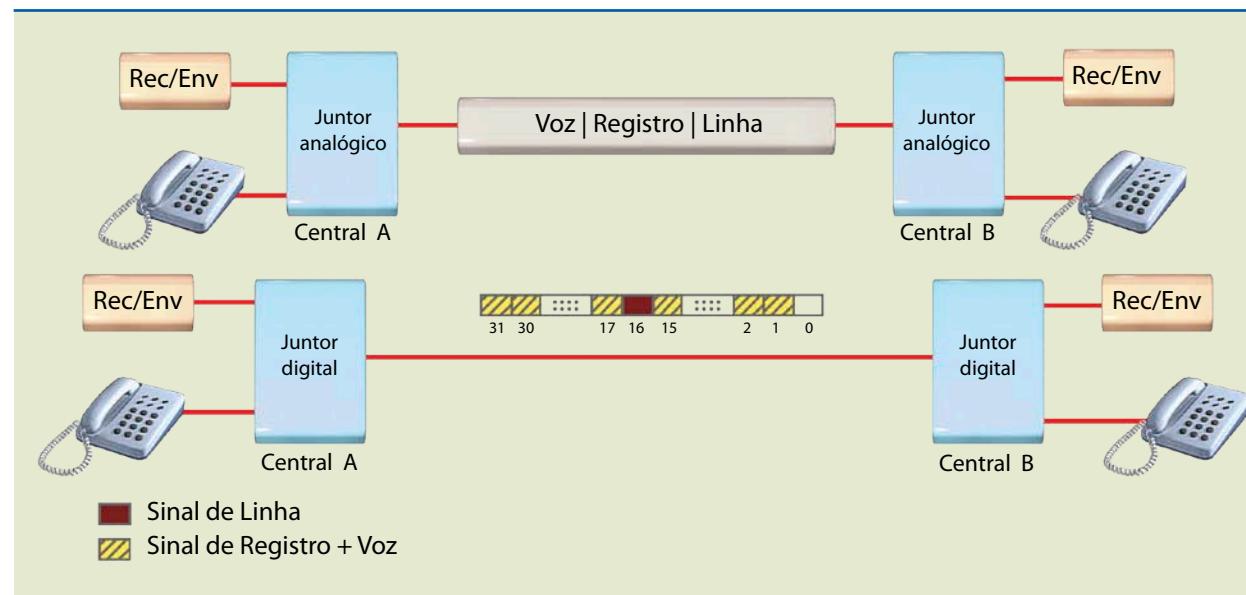
- Identificação do assinante chamado.
- Estado operacional do assinante chamado.
- Categoria do assinante chamador.
- Identificação do assinante chamador.
- Estado operacional dos órgãos envolvidos na chamada.

8.7.6 Sinalização associada a canal

As sinalizações de linha e de registro descritas anteriormente fazem parte da **sinalização associada a canal** (figura 8.25), uma vez que as informações de sinalização concorrem com o sinal de voz no mesmo espaço físico, ou seja, a sinalização utiliza os mesmos circuitos que posteriormente transportarão a voz.

Figura 8.25

Sinalização associada a canal.



A sinalização associada a canal apresenta as seguintes desvantagens:

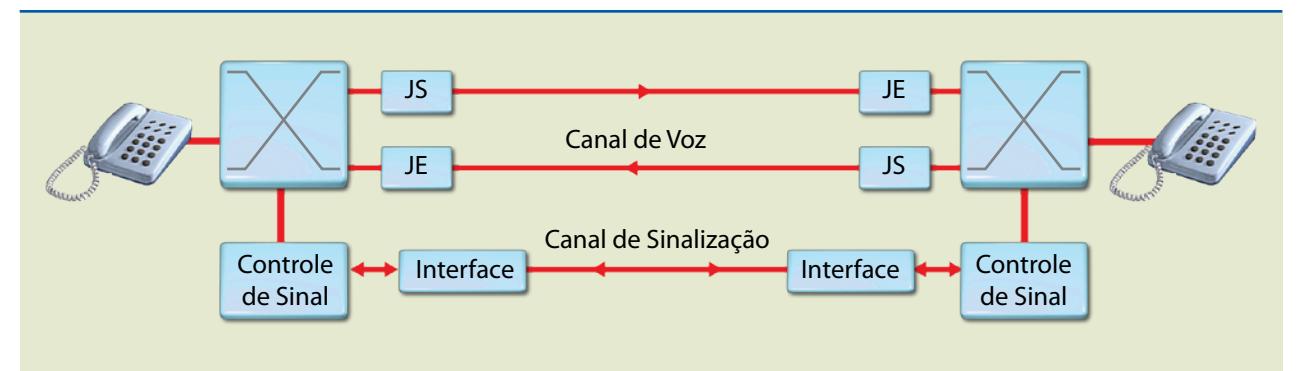
- Cada enlace transporta a sinalização referente a seu(s) próprio(s) circuito(s). Não é possível o envio de códigos por um enlace relacionado a canais de voz de outro enlace.
- Os códigos formados por pares de frequências formam um quadro limitado de significados, todos eles telefônicos. Isso impossibilita o envio de informação não relativa ao tratamento de chamada (dados).
- Tratamento sequencial: completar uma chamada requer numerosas trocas.
- Sinalização dentro da banda de voz, impossibilitando sinalizar em conversação.

8.7.7 Sinalização por canal comum

Os sistemas que utilizam esse tipo de sinalização contêm um canal de comunicação dedicado à sinalização, interligando os sistemas de processamento das centrais envolvidas na conexão, independentemente dos outros canais existentes para o transporte de voz e dados comutados.

Os caminhos usados pela sinalização e pelo tráfego de voz e dados são separados, resultando no desmembramento da rede telefônica em duas: rede de sinalização e rede de conexão de circuitos (figura 8.26).

Figura 8.26
Sinalização separada do canal de voz.



O canal de sinalização separada do canal de voz apresenta as seguintes características:

- É um canal de dados entre as centrais.
- Emprega protocolo de comunicação digital, baseado no modelo OSI (*open system interconnection*).
- Não precisa utilizar o mesmo caminho dos canais de áudio.
- Pode ocupar qualquer um dos canais do tronco digital, exceto o zero, que transporta informação de sincronismo.
- Normalmente é usado o canal 16 de um dos troncos de 2 Mbps para transportar informações de sinalização.
- O ITU-T padronizou um sistema de sinalização por canal comum denominado sistema nº 7 (SS#7), que é o sistema adotado no Brasil.

A rede de sinalização por canal comum é independente da rede de telefonia, e os sinais são transferidos utilizando comutação de pacotes (64 kbps). Cada componente da rede de sinalização SS#7 é chamado de ponto de sinalização, com três funções básicas:

- Enviar e receber as informações (corresponde às centrais de comutação telefônica).
- Rotear ou transferir as informações.
- Permitir o acesso a banco de dados centralizados.

Essas funções definem os tipos de pontos de sinalização:

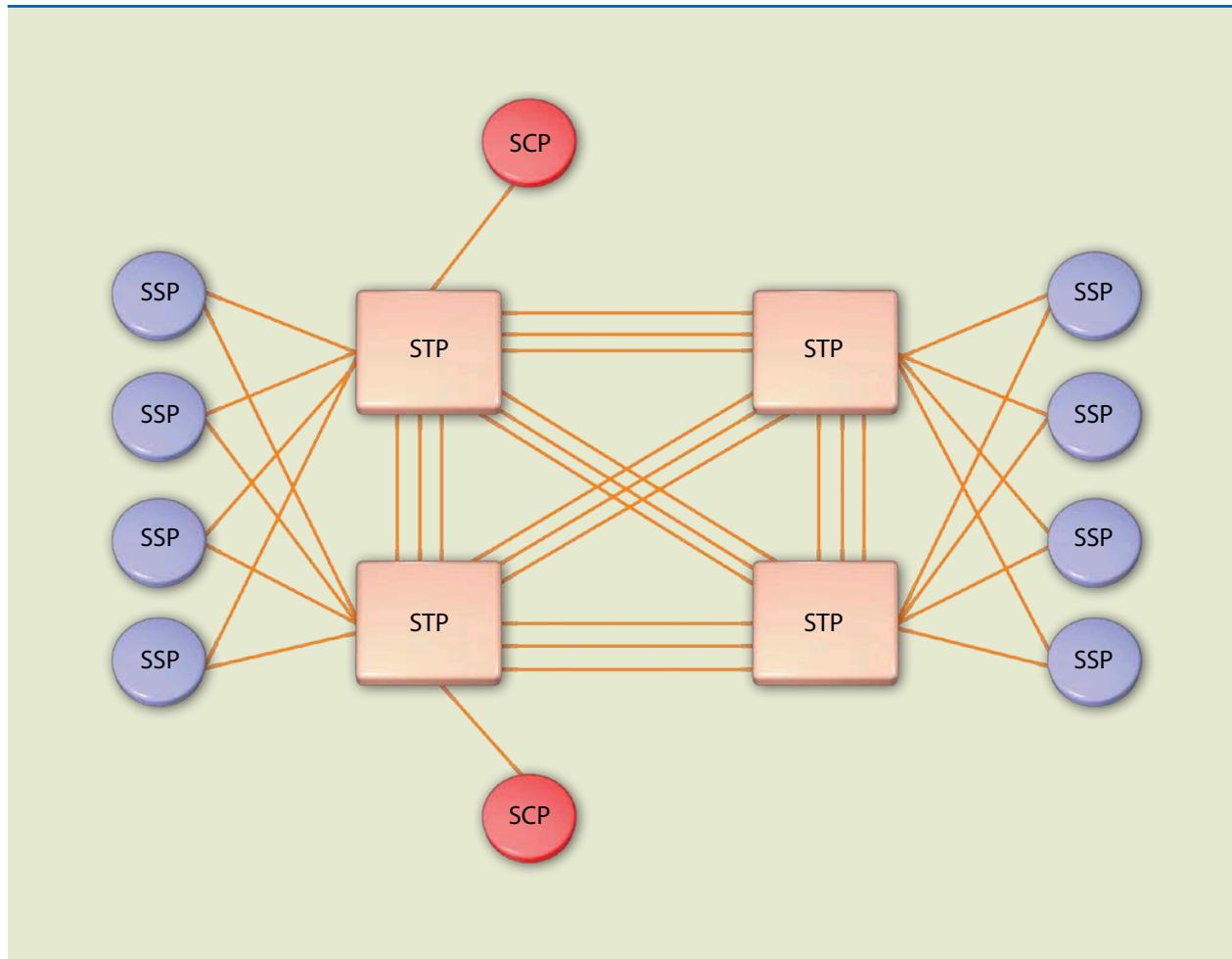
- **Service switching point (SSP) ou ponto de serviço (PS)** – Corresponde às centrais de comutação. Essas centrais geram as mensagens de sinalização telefônica que devem ser transmitidas de um SSP para outro.
- **Signal transfer point (STP) ou ponto de transferência de sinalização (PTS)** – Responsável pelo roteamento das mensagens de sinalização entre os SSPs. Não tem função de comutação de áudio, embora muitos equipamentos possam executar tanto a função de STP como de SSP.

- **Service control point (SCP)** – Corresponde aos bancos de dados que podem ser acessados pelos demais pontos da rede para obter informações necessárias para disponibilizar serviços mais elaborados.

Cada ponto da rede de sinalização possui um endereço chamado *point code*. É o *point code* que permite que um ponto da rede acesse outro ponto. Para isso, o sistema insere em cada mensagem enviada o endereço correspondente ao ponto de destino que se deseja acessar (figura 8.27).

Figura 8.27

Arquitetura da rede de sinalização SS#7.



A rede SS#7 possui três modos de operação (figura 8.28):

- **Modo associado** – As mensagens de sinalização entre duas centrais são transportadas em uma rota que consiste de um enlace direto entre as duas centrais.
- **Modo não associado** – A rota de sinalização entre duas centrais é composta por mais de um enlace de sinalização. Um ou mais STPs são usados para transferência do tráfego de sinalização. Além disso, o caminho percorrido pela mensagem não é único, ou seja, existem várias alternativas para a sinalização (o caminho não é predeterminado).
- **Modo quase associado** – Modo particular do não associado.

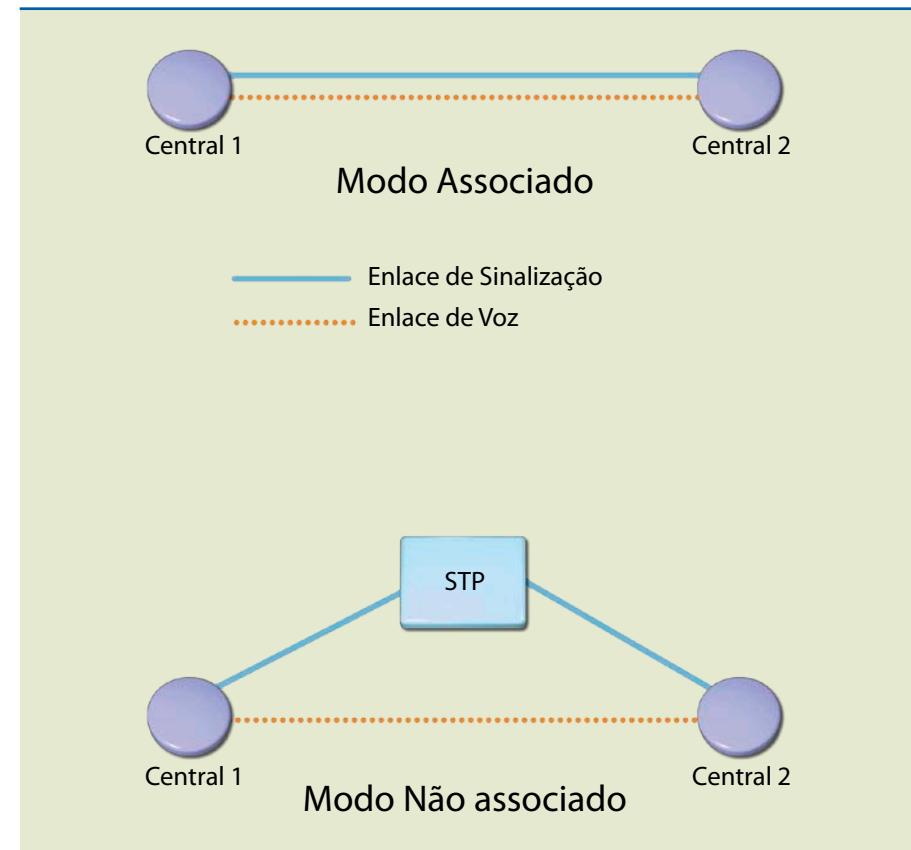


Figura 8.28

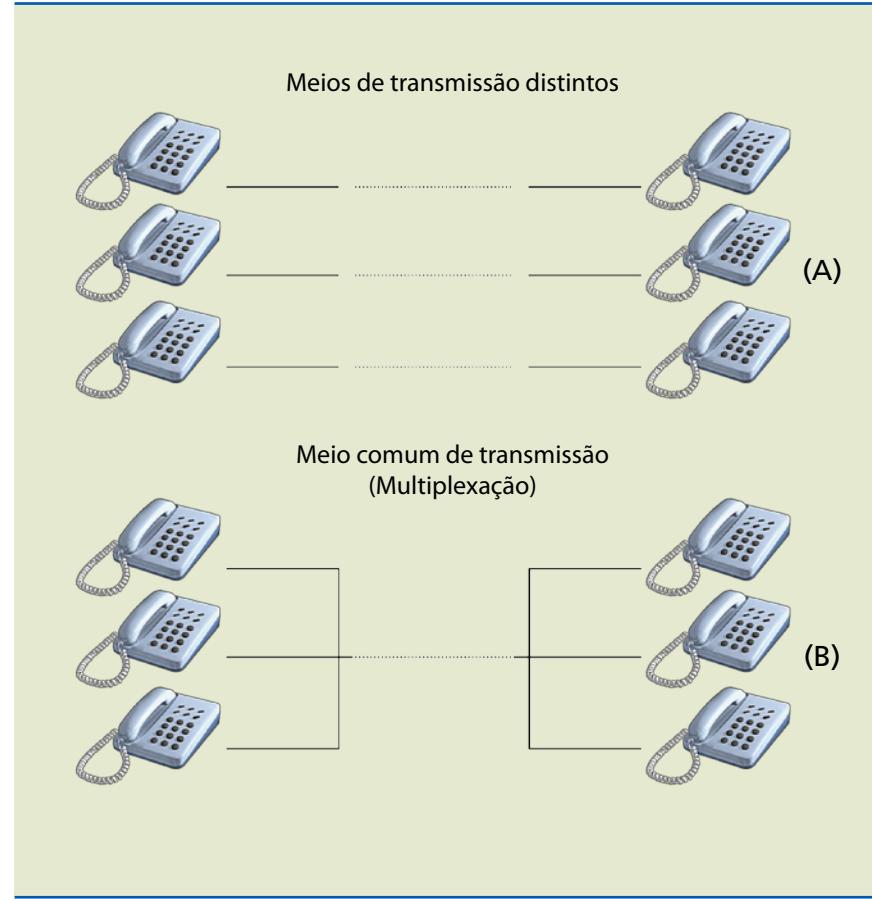
Modos de operação da rede de sinalização SS#7.

Capítulo 9

Multiplexação de canais

Multiplexação é uma técnica de transmissão de sinal em que determinado número de sinais de voz passa a ser combinado em um sinal composto e transmitido por um único circuito de comunicação (figura 9.1).

Figura 9.1
Meios de transmissão:
(a) comum e
(b) multiplexado.



Para que vários sinais sejam transmitidos simultaneamente por um meio comum, eles devem ser tratados de tal maneira que não haja interferência entre si, possibilitando a recuperação no terminal de recepção e estabelecendo, assim, uma multiplexação.

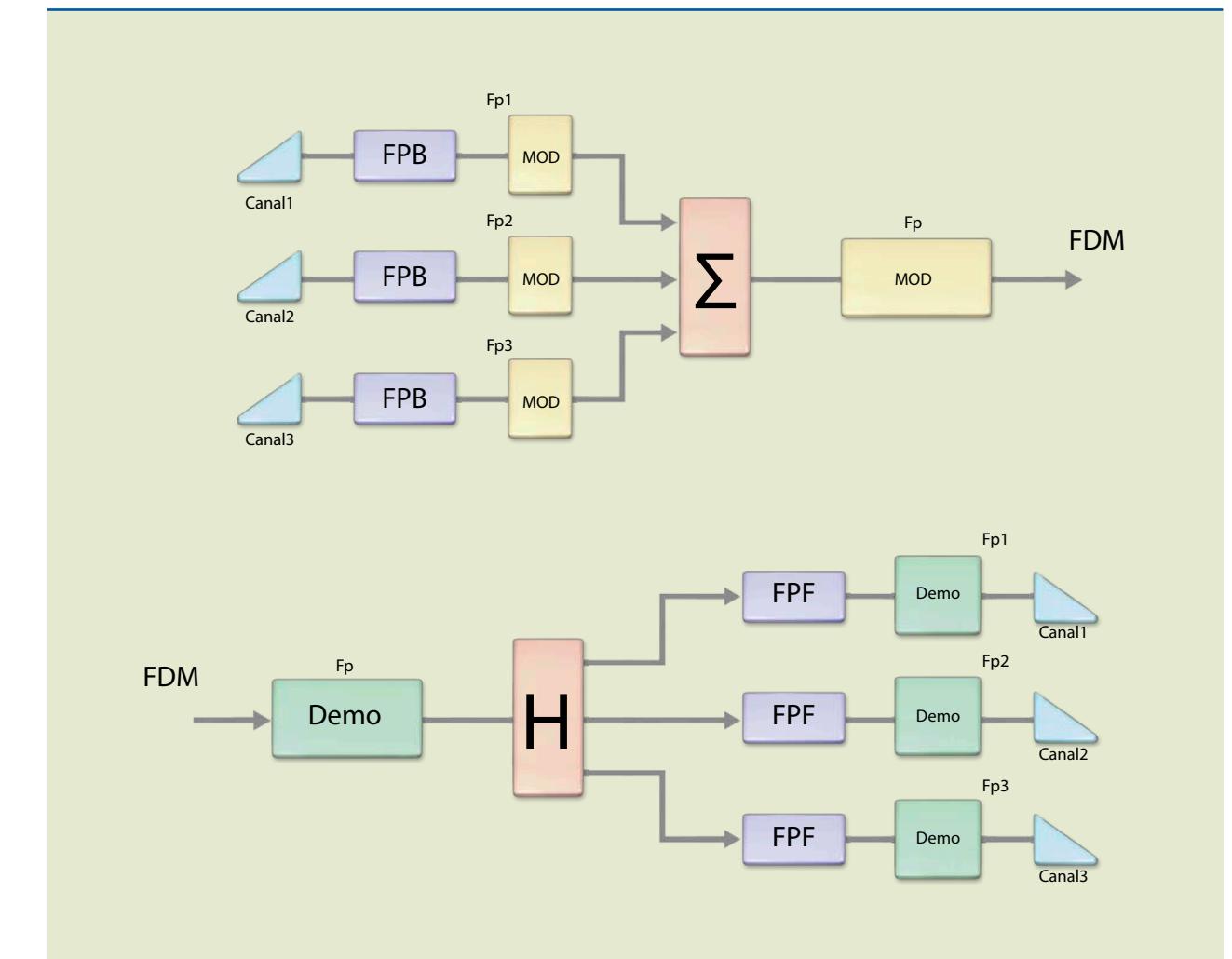
Existem basicamente dois tipos de multiplexação:

- Multiplexação por divisão em frequência (FDM).
- Multiplexação por divisão no tempo (TDM).

9.1 Multiplexação por divisão em frequência

Os diversos sinais devem ser transladados em frequência por processos de modulação e transmitidos simultaneamente por um único meio. Utilizado em sistemas de comunicação analógicos, esse tipo de multiplexação é limitado pelo número de portadoras disponíveis.

Figura 9.2
Multiplexação por divisão em frequência.



A figura 9.2 apresenta o diagrama da multiplexação por divisão em frequência, em que:

- FPB é filtro passa-baixa;
- FPF é o filtro passa-faixa – (fixado em 300 a 3400 Hz).

- MOD é o modulador;
- Fpn, a frequência da portadora de canais;
- S, o somador;
- Fp, a frequência da portadora de transmissão;
- FDM, o sinal multiplexado por divisão em frequência;
- DEMOD, o demodulador;
- H, a híbrida;
- FPF, o filtro passa-faixa (fixado em 300 a 3 400 Hz).

9.2 Multiplexação por divisão no tempo

Esse sistema possibilita a transmissão de vários sinais, cada um deles controlado no tempo, ou seja, o intervalo de tempo entre duas amostras consecutivas de determinado sinal é utilizado para transmitir as amostras de outros sinais. Para transmitir sinais usando o TDM, a informação deve estar digitalizada.

Os diversos sinais de entrada delimitados por filtros passa-baixa são sequencialmente amostrados no transmissor por uma chave rotativa (comutador), que extrai uma amostra de cada sinal de entrada após uma varredura completa. Assim, na saída do comutador encontra-se uma forma de sinal modulado por amplitude de pulso, a qual contém amostras dos vários canais periodicamente entrelaçadas no tempo.

No receptor existe uma chave rotativa (distribuidor) idêntica à do transmissor, que separa as amostras e as distribui uma a uma aos filtros passa-baixa, que, por sua vez, reconstituem o sinal original.

Vários tipos de transmissão utilizam o TDM, porém serão abordados apenas dois deles:

- Modulação por amplitude de pulso (PAM).
- Modulação por código de pulso (PCM).

9.2.1 Modulação por amplitude de pulso (PAM)

O sinal PAM (*pulse amplitude modulation*) é formado por pulsos unipolares, cujas amplitudes são proporcionais aos valores das amostras instantâneas da mensagem. Pelo fato de a inteligibilidade do sinal ser representada pela altura dos pulsos, uma pequena parcela de ruído poderá modificar essa amplitude e, consequentemente, o conteúdo da mensagem. A demodulação para sinais PAM é efetuada por equalização e por filtros passa-baixa.

9.2.2 Modulação por código de pulso (PCM)

Esse é o tipo de modulação por pulsos mais utilizado hoje. Os demais aqui apresentados constituem representações analógicas, cujos parâmetros principais variam continuamente e podem assumir qualquer valor correspondente ao sinal. Qualquer superposição de ruídos indesejáveis ao sinal não mais poderá ser discernida do sinal original.

O PCM apresenta algumas vantagens em relação à qualidade do sinal. Para entendê-las, vamos analisar a seguinte situação: em uma modulação por amplitude de pulso (PAM) em que se tomam como parâmetros modulados valores predeterminados de amplitude com distâncias maiores comparados a ruídos, será possível no terminal de recepção detectar precisamente o valor de amplitude transmitido. Dessa maneira, os efeitos nocivos de ruído aleatório podem ser facilmente eliminados. Esse processo de utilização de amplitudes discretas em PAM possibilita o emprego de regeneradores ao longo da linha de transmissão, superando com grande vantagem outros meios de transmissão analógica.

Os valores amostrados do sinal são comparados e aproximados dos níveis discretos mencionados, denominados níveis de quantização, e em seguida introduzidos em um codificador, o que converte as amostras quantizadas (discretas no tempo e em amplitude) em uma palavra digital, isto é, em uma palavra codificada para cada amostra, gerando, assim, um sinal PCM. Apenas a presença ou a ausência de pulsos determinará a mensagem recebida e, consequentemente, sua qualidade. A distorção dos pulsos transmitidos não degradará a qualidade do sinal.

A figura 9.3 mostra os tipos de modulação empregados em TDM.

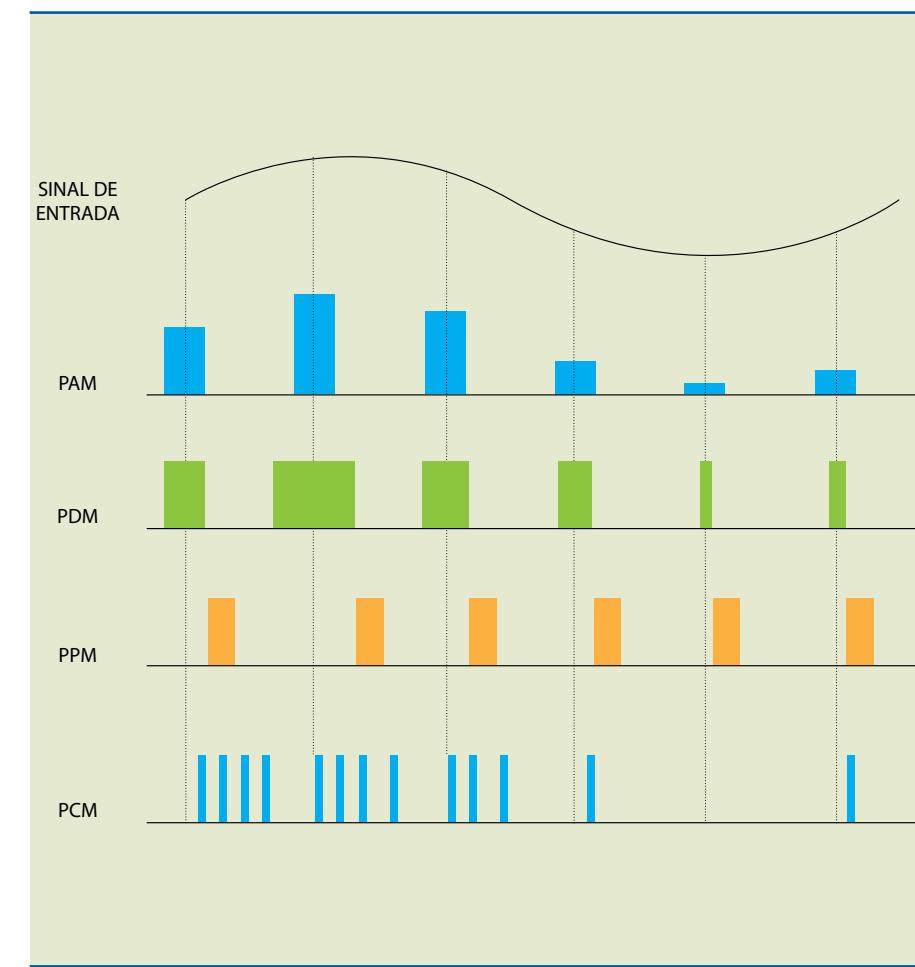


Figura 9.3
Tipos de modulação TDM.

A figura 9.4 apresenta o sistema TDM com modulação PAM.

Figura 9.4
Sistema TDM com modulação PAM.

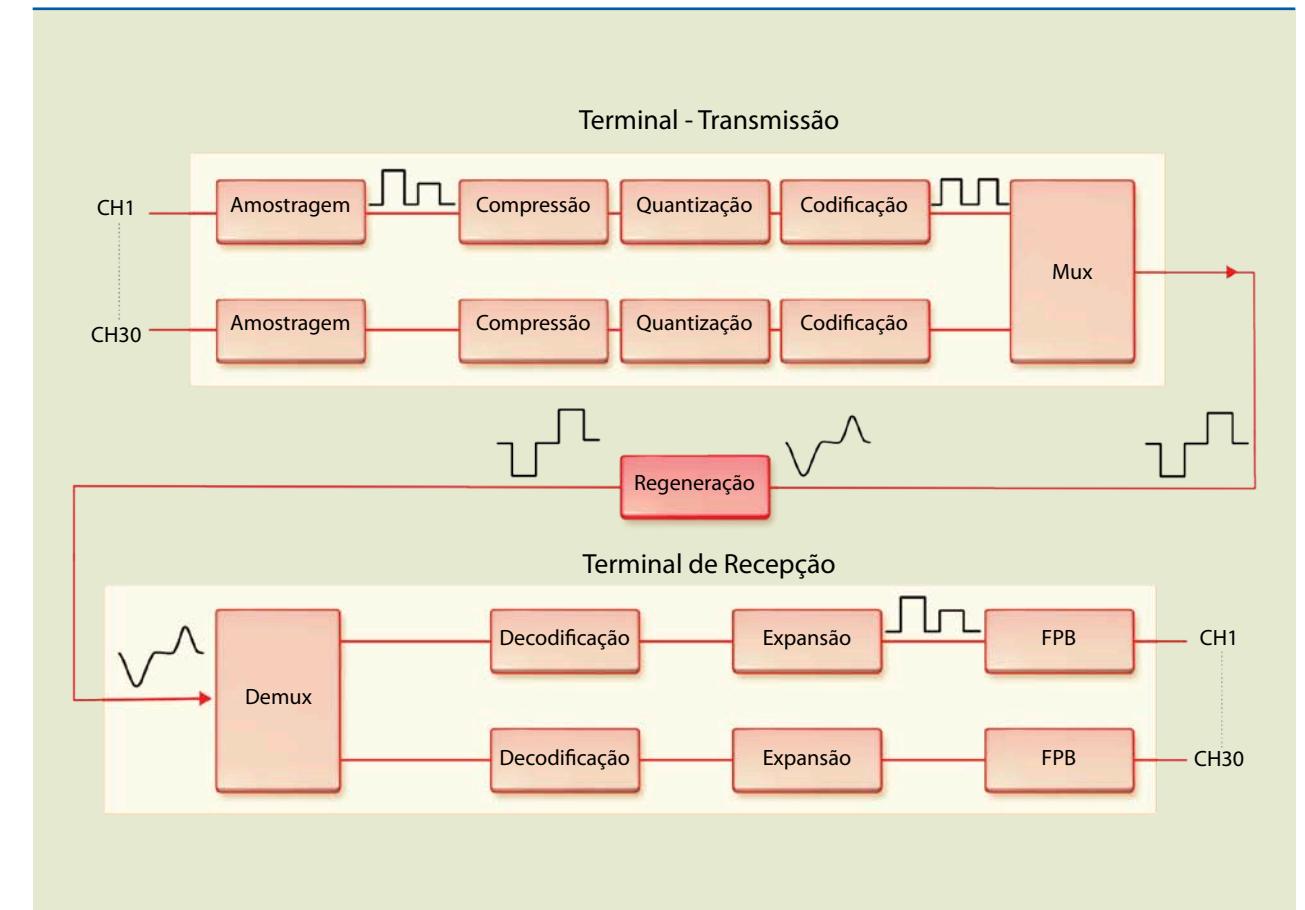
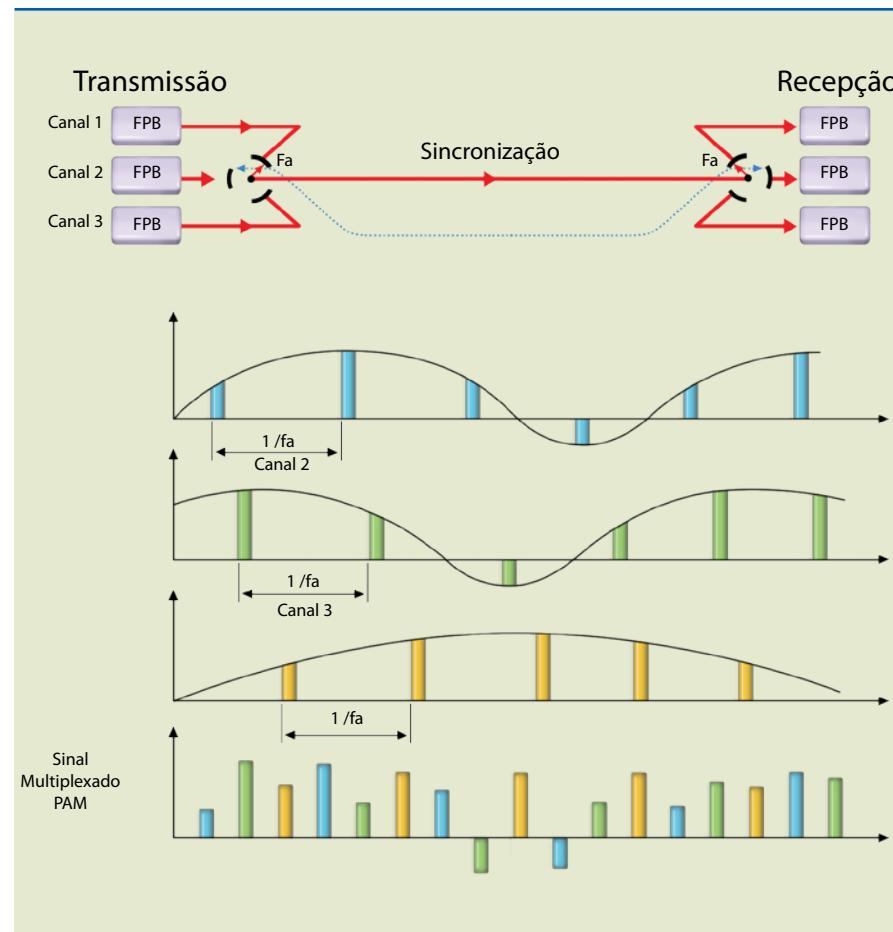
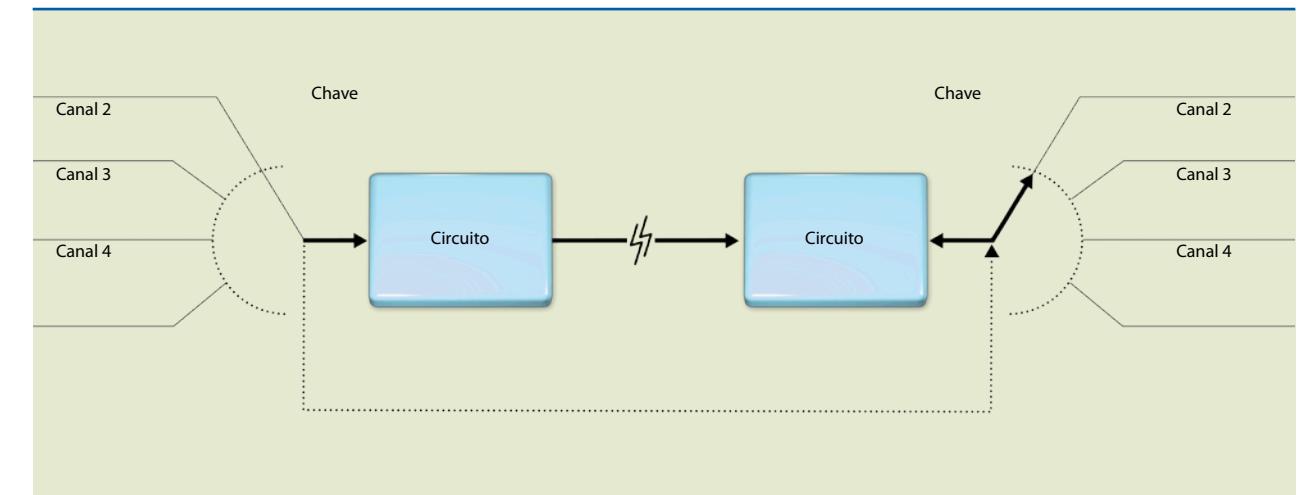


Figura 9.5
Etapas da transmissão PCM.

9.3 Amostragem

Consiste em substituir o sinal analógico por uma sucessão de amostras de curta duração em intervalos regulares. Essa sucessão de amostras contém as informações necessárias para posterior recuperação do sinal original. A figura 9.6 ilustra um exemplo de amostragem.

Figura 9.6
Amostragem.



As principais vantagens da técnica PCM são:

- **Relação sinal/ruído** – A relação sinal/ruído independe da distância, devido ao uso de repetidores que regeneram o sinal ao longo da linha. Essa regeneração é relativamente fácil de ser feita, pois os repetidores simplesmente têm de decidir sobre ausência ou presença de pulso. Isso assegura alta qualidade e baixa perda do sistema de transmissão.
- **Aplicações** – O sistema pode ser utilizado em transmissão de várias informações, como telefonia, imagem, dados etc.
- **Meios de transmissão** – O PCM assegura o uso de radioenlaces e/ou longas rotas de fibras ópticas. Permite, ainda, fácil expansão das rotas, sem a necessidade de modificação do meio.
- **Tecnologia** – O sistema não necessita dos diversos filtros dispendiosos usados no FDM, pois utiliza tecnologia digital, o que de imediato o torna mais econômico.

O sistema PCM é composto de várias etapas, nas quais o sinal é tratado devidamente antes de ser transmitido. Essas etapas são apresentadas no diagrama de blocos da figura 9.5.

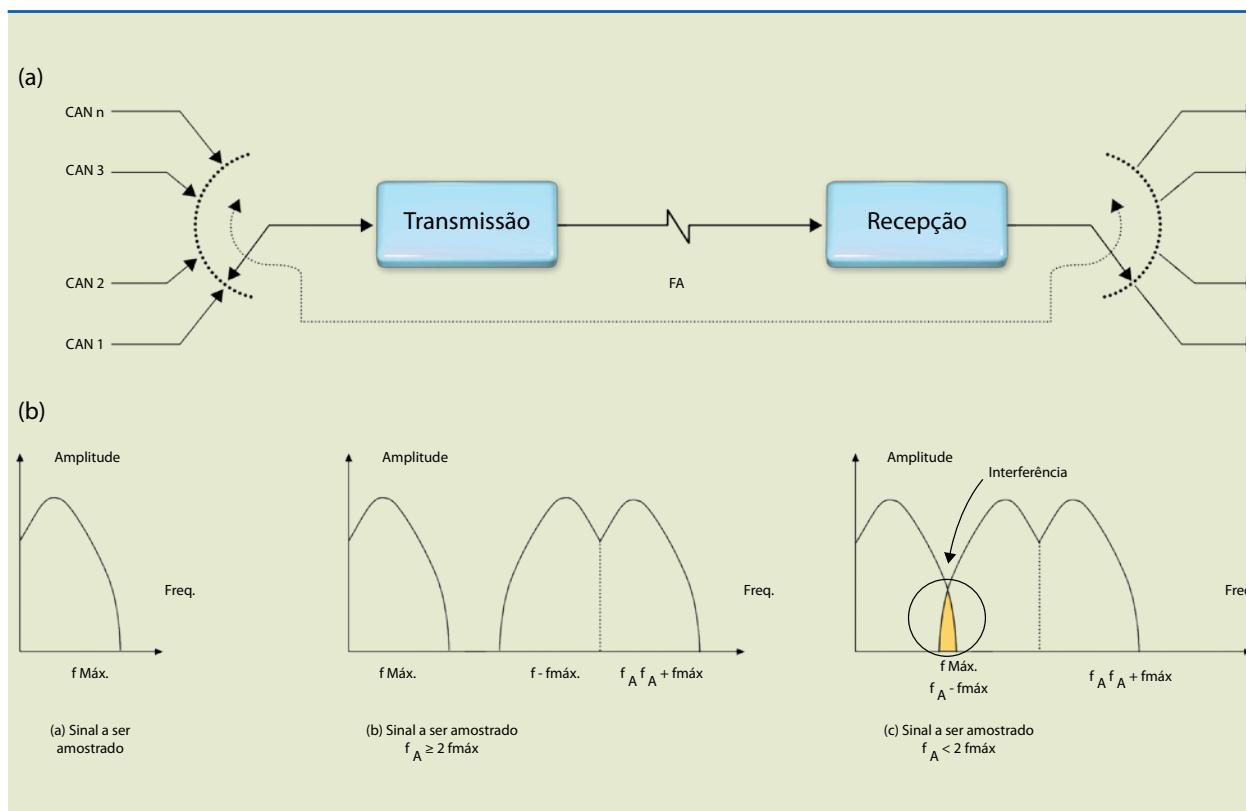
Para efetuar essa amostragem, utiliza-se uma chave eletrônica com frequência f_a (frequência de amostragem).

Analisando a figura 9.6, podemos notar que, se a frequência de amostragem for menor que duas vezes a máxima frequência a ser amostrada, o sinal não poderá ser recuperado com fidelidade. Por isso, a frequência de amostragem deve ser no mínimo duas vezes a máxima frequência do sinal a ser amostrado (teorema da amostragem), conforme demonstra a expressão:

$$f_a \geq 2f_{\max} \quad (9.1)$$

Figura 9.7

- (a) Representação dos canais e
- (b) espectro de frequências PAM.



Para o PCM, a frequência de amostragem adotada é de 8 kHz, pois possibilita a utilização de um filtro de fácil execução e com faixa de guarda de 900 Hz. Essa escolha permite maior segurança e inteligibilidade da informação na amostragem do canal, levando em conta que o canal de voz ocupa 4 kHz de banda (figura 9.7).

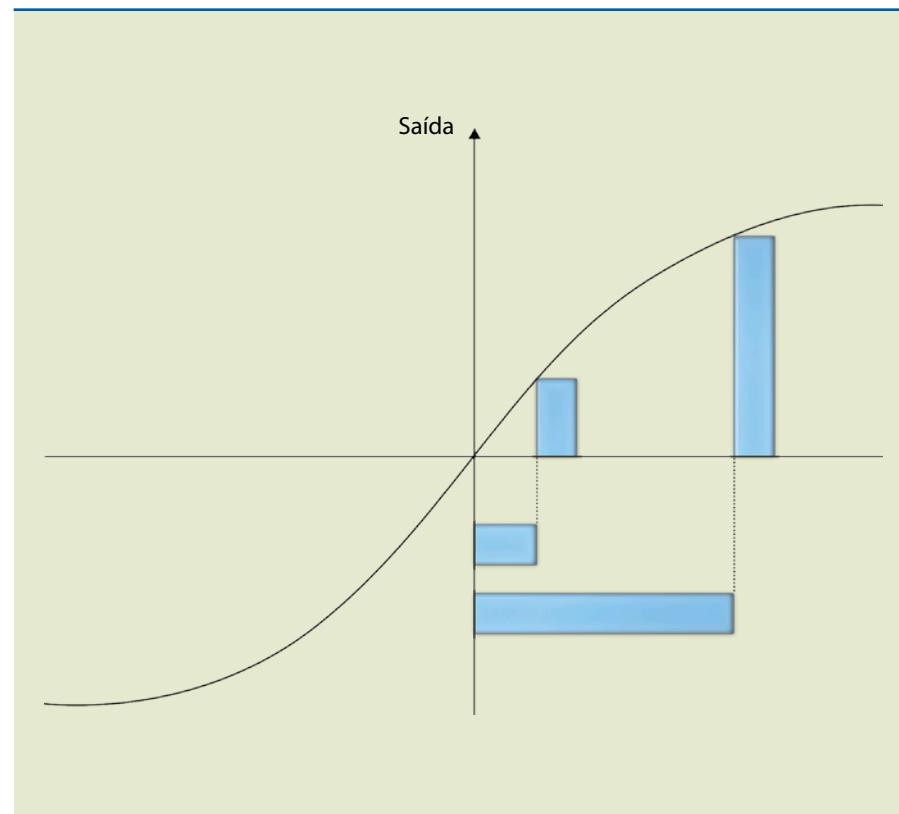
Com a quantização linear, isto é, níveis discretos igualmente espaçados, o ruído de quantização passa a ser igual para cada nível. Nessas condições, a relação sinal/ruído é menor para pulsos de pequena amplitude do que para pulsos de grande amplitude. Isso significa que sinais de pequena amplitude sofrem maior interferência do ruído de quantização do que sinais de grande amplitude.

Para evitar essa interferência do ruído, mantendo os 256 níveis de quantização com intervalos igualmente espaçados, é preciso que expandir a amplitude dos pequenos pulsos e comprimir a dos grandes pulsos. Esse procedimento que serve para melhorar a relação sinal/ruído é denominado compressão.

A figura 9.8 mostra a forma geral das curvas representativas das leis logarítmicas de compressão.

Figura 9.8

Características das leis de compressão.



Nos sistemas PCM normalizados atualmente existem as seguintes leis de compressão:

- **Lei μ** – Não é utilizada no Brasil. A equação que a define é:

$$Y = \frac{\log(1+\mu x)}{\log(1+\mu)} \quad (9.2)$$

em que $\mu = 255$.

9.4 Compressão e expansão

Para que haja inteligibilidade superior a 98%, basta que a relação S/NQ (potência média do sinal/potência média do ruído de quantização) seja maior que 26 dB. Para isso, são necessários pelo menos 32 níveis de quantização (²⁵). Os atuais sistemas PCM utilizam 256 níveis de quantização (8 bits por unidade de informação).

- **Lei A** – Adotada para os sistemas de 32 canais em que a curva é aproximada para 13 segmentos de reta. As equações que a definem são:

$$y = \frac{AX}{1+\log A}, \text{ para } 0 \leq X \leq \frac{1}{A} \quad (9.3)$$

$$y = \frac{1+\log(A \cdot X)}{1+\log A}, \text{ para } \frac{1}{A} \leq X \leq 1$$

em que:

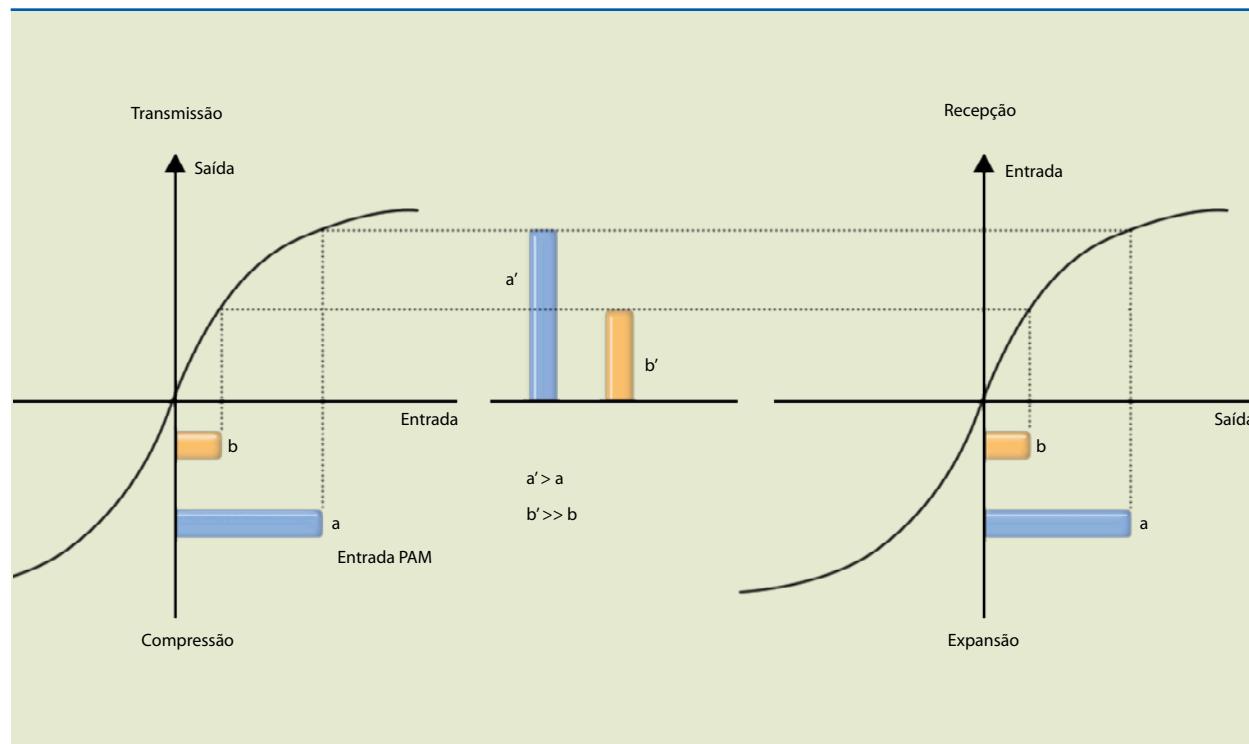
$A = 87,6$ (valor definido empiricamente para que a relação S/N seja constante);
 X é a tensão de entrada;
 y , a tensão de saída.

Para a execução prática dos equipamentos PCM, as curvas definidas pela lei de compressão são aproximadas por segmentos de reta com as seguintes características:

- Cada segmento (trecho) tem o mesmo número de níveis (16).
- Os intervalos entre níveis de um mesmo segmento são iguais. Depois de ser decodificado na recepção, o pulso precisa ser restaurado, ou seja, expandido, por meio de um processo denominado expansão, que consiste em aplicar uma lei exatamente inversa à da compressão, como pode ser visto na figura 9.9.

Figura 9.9

Método de compressão/expansão.



9.5 Quantização

Trata-se da subdivisão da faixa dinâmica do sinal em determinado número de níveis discretos, chamados níveis de quantização (N). Para facilitar a implementação, a codificação dos níveis é feita de acordo com o sistema binário. Consequentemente, o número de níveis de quantização é uma potência inteira de dois:

$$N = 2^n \quad (9.4)$$

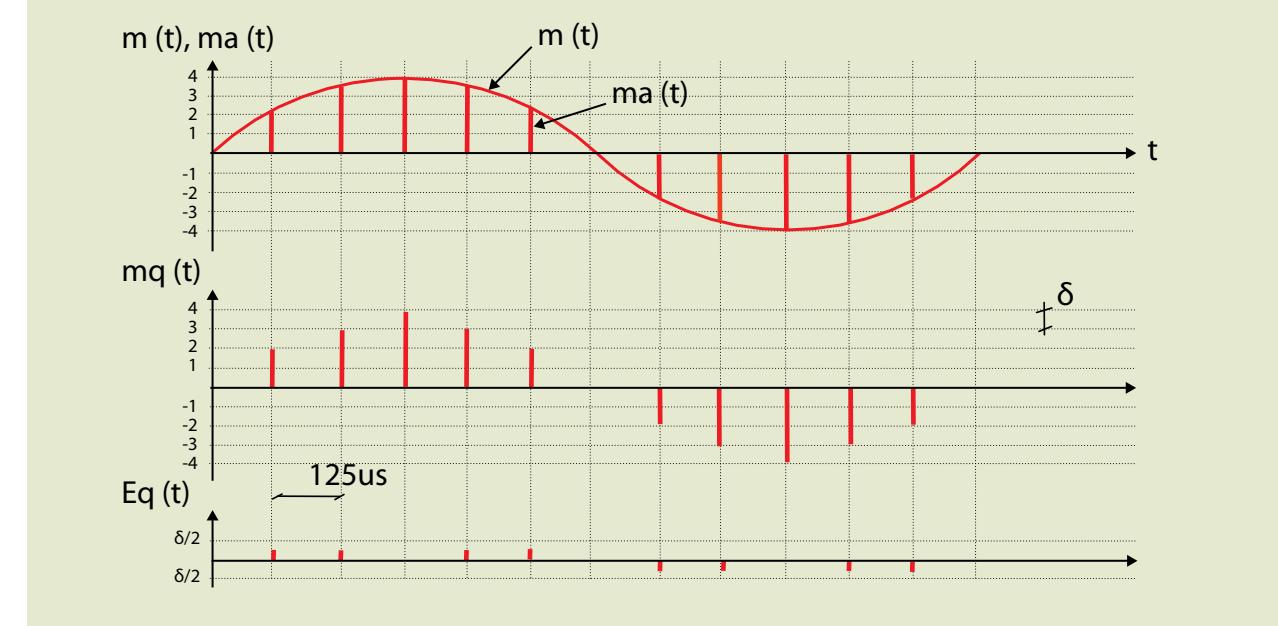
em que n é o número de bits que representa cada nível.

Desse modo, em cada instante da amostragem, a amplitude do sinal é aproximada para o nível de quantização mais próximo. Essa aproximação introduz um erro, denominado ruído de quantização, que é um tipo de ruído de fundo (similar ao ruído branco). O ruído de quantização será tanto menor quanto maior for o número de níveis de quantização introduzidos.

A figura 9.10 mostra um exemplo do processo de quantização de uma senoide.

Figura 9.10

Processo de quantização.



9.6 Codificação/decodificação

A codificação é usada após a compressão para converter a amplitude de cada pulso PAM em uma combinação de bits 0 e 1. Como existem 256 níveis de quantização, são necessários 8 bits, pois $2^8 = 256$.

A figura 9.11 apresenta, de forma simplificada, o processo de codificação utilizando 8 bits.



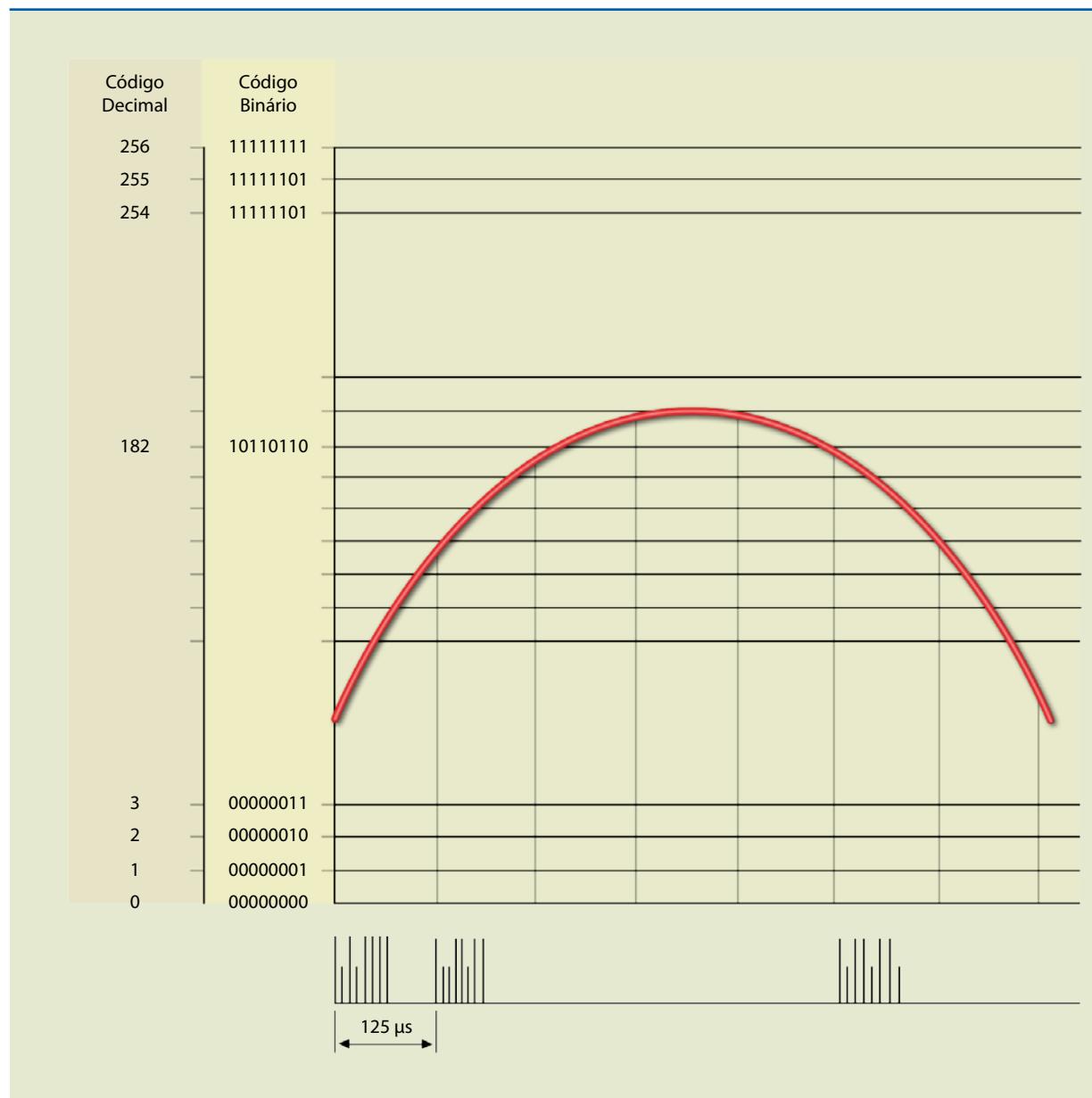


Figura 9.11
Processo de codificação com 8 bits.

O formato da palavra código utilizado para representar cada valor codificado na figura 9.11 está ilustrado na figura 9.12.

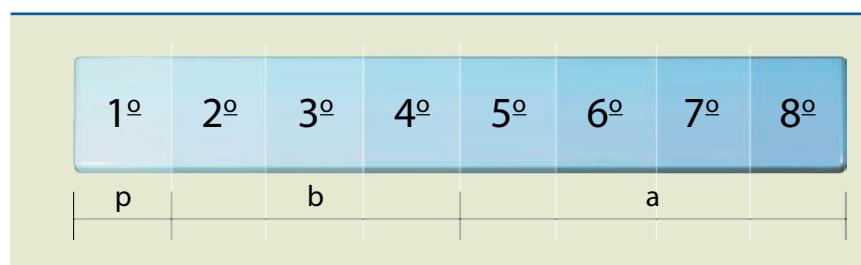


Figura 9.12
Formato da palavra código de 8 bits.

O significado de cada campo da palavra código é o seguinte:

- p indica a polaridade do pulso PAM, isto é, se ele se encontra na metade superior ($p = 1$) ou inferior da curva de compressão ($p = 0$).
- b indica o segmento dentro da metade definida por p , em que se encontra a amostra em questão (3 bits podem representar 8 segmentos). Para a característica de compressão utilizada, a curva é dividida em 13 trechos. Porém, como o trecho número 7 é subdividido em 4 segmentos, há na realidade 16 segmentos.
- a indica o nível dentro do segmento ou trecho do segmento (4 bits podem representar 16 níveis). A figura 9.13 ilustra a curva característica de compressão com a divisão em segmentos e trechos.

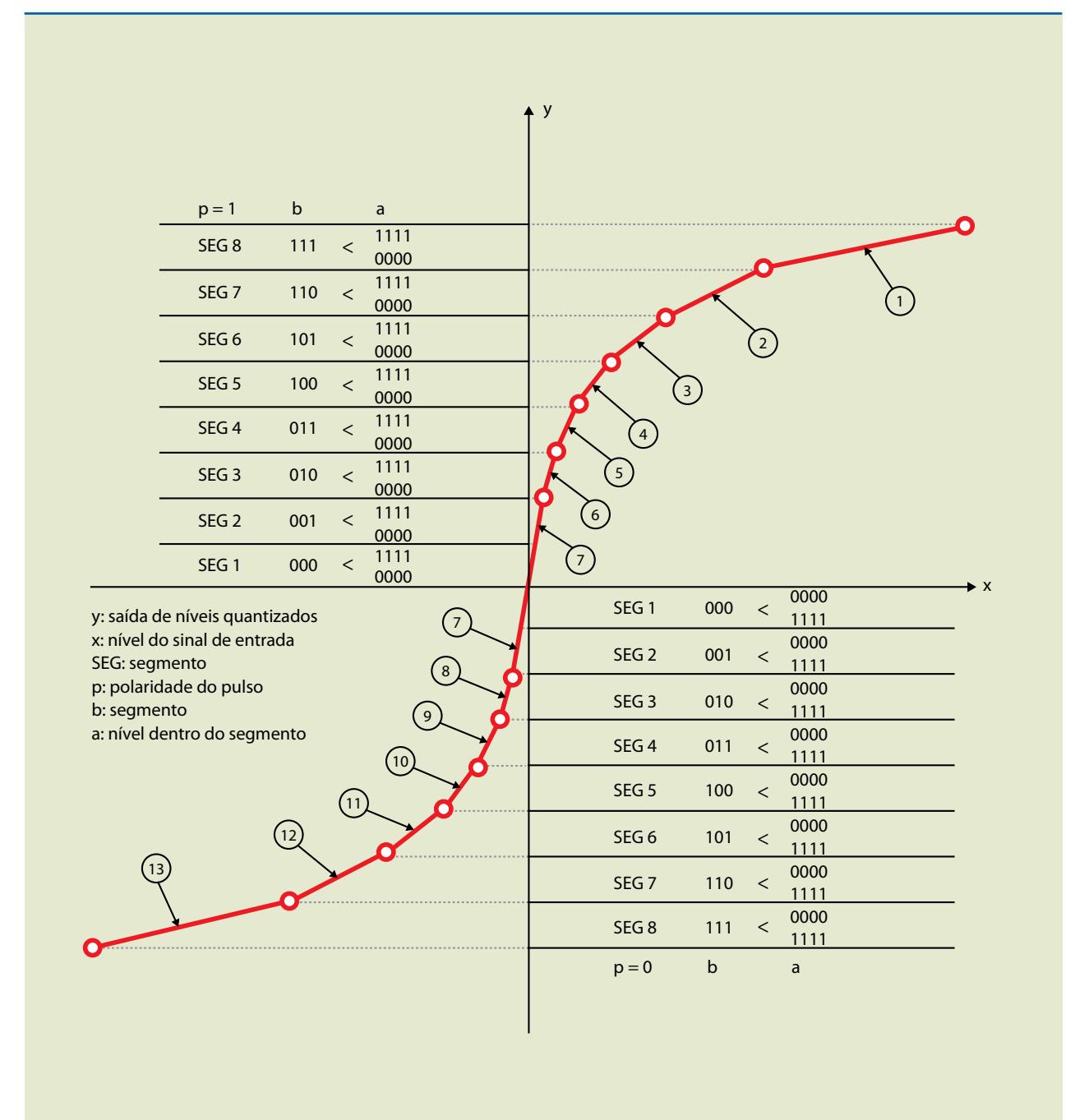
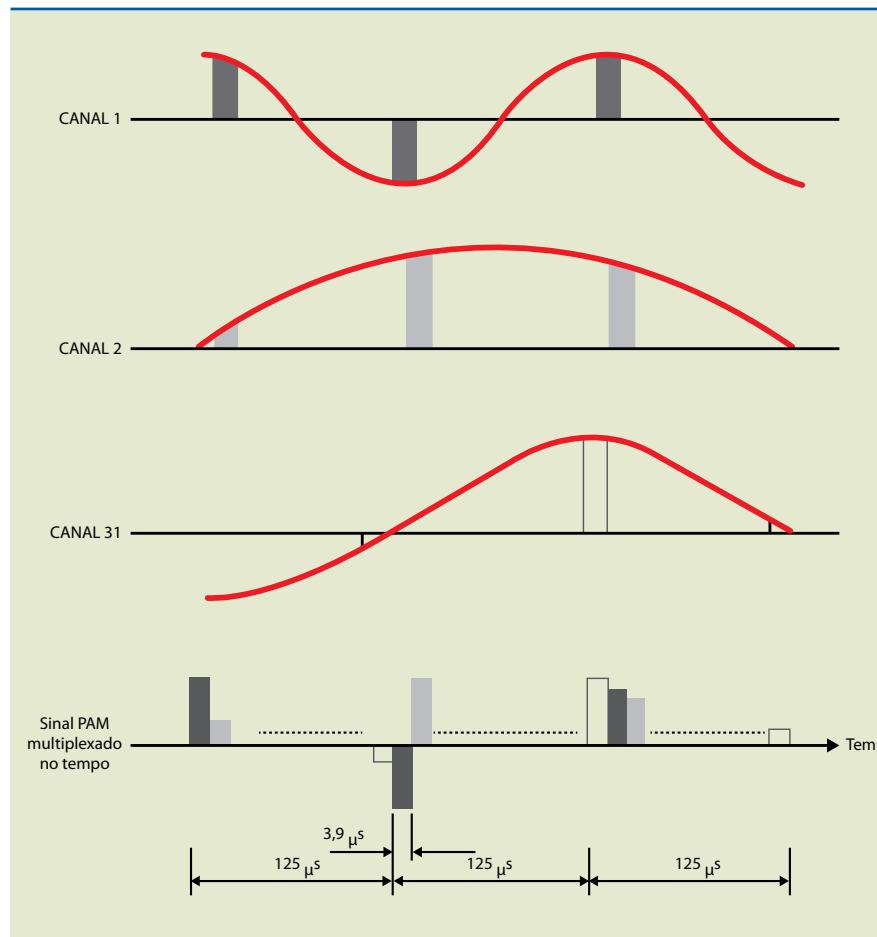


Figura 9.13
Curva característica de compressão dividida em trechos e segmentos.

Figura 9.14

Estrutura do sinal PAM multiplexado.



9.7 Estrutura do sinal na linha

O sinal a ser transmitido na linha possui uma estrutura definida. Essa estrutura permite enviar informação de voz à sinalização de linha e bits que possibilitam a monitoração do sinal quanto ao alinhamento e sincronismo na recepção.

Para essa estrutura, existem os seguintes parâmetros:

- **Pulso (bit)** – É o elemento binário. A presença de amplitude (positiva ou negativa) indica 1; a ausência, 0. Um pulso é emitido no intervalo de tempo $t = 488 \text{ ns}$ no código NRZ (*no return to zero*) e no intervalo de tempo $t/2 = 244 \text{ ns}$ no código RZ (*return to zero*).
- **Unidade de informação ou intervalo de tempo de canal (ITC)** – É a representação codificada da amostra do sinal de voz. Atualmente é composta de 8 bits emitidos em um intervalo de tempo $t = 3,9 \mu\text{s}$.
- **Quadro (Q)** – É a sequência das 32 unidades de informações retiradas sucessivamente dos 30 canais multiplexados por divisão de tempo. Um quadro é emitido no tempo $T = 125 \mu\text{s}$.
- **Multiquadro (MQ)** – É a sequência de 16 quadros que se completam com informações de sinalização, sincronismo, alarme etc. dos 30 canais. Um multiquadro é emitido no tempo $T_{\mu} = 16 \cdot T = 2 \text{ ms}$.

Definidos esses parâmetros, pode-se calcular a taxa de transmissão de bits do sinal multiplexado, utilizando a expressão:

$$f_b = n_c \cdot n_b \cdot f_a \quad (9.5)$$

em que:

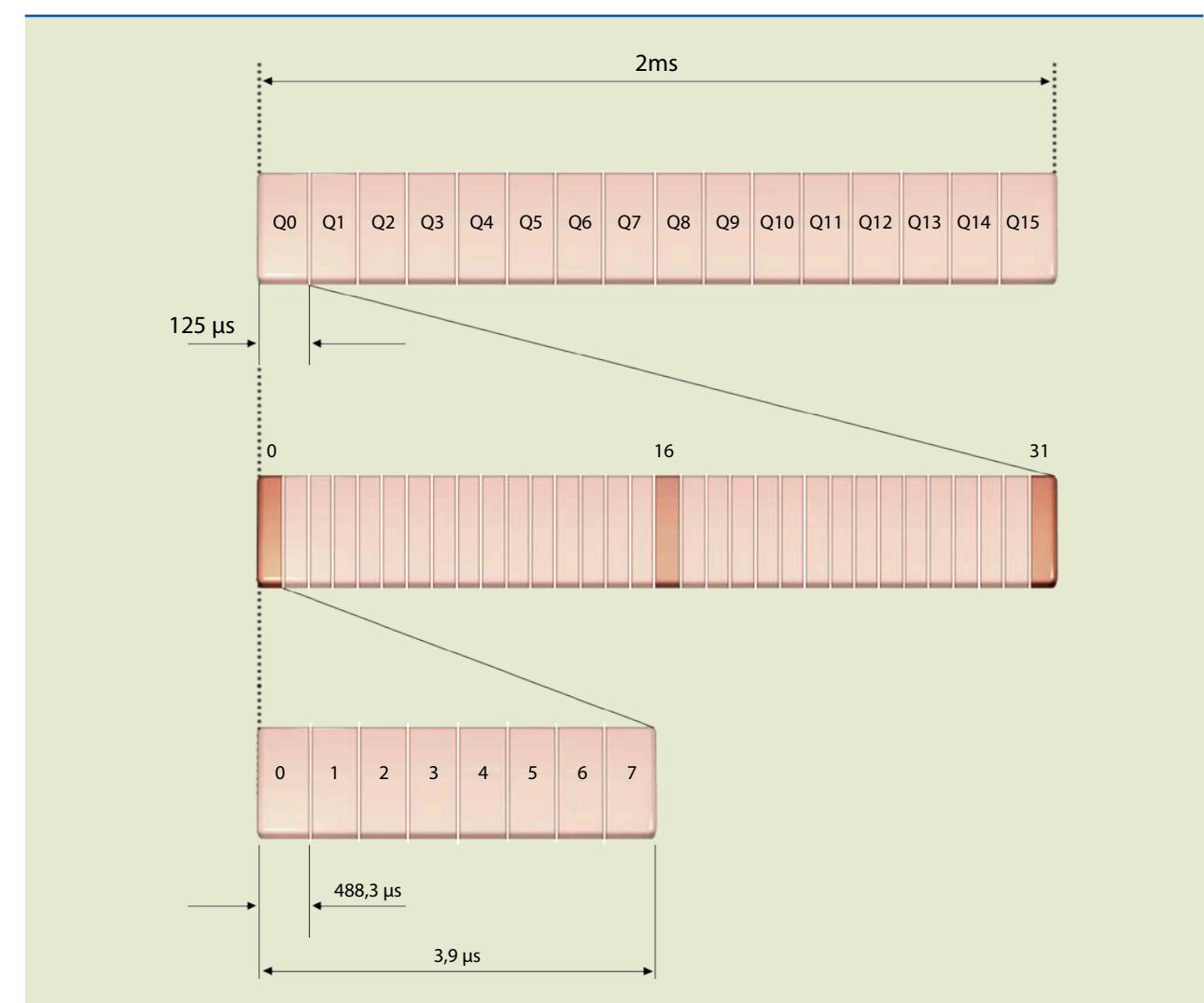
- f_b é a taxa de bits;
- n_c , o número de canais;
- n_b , o número de bits;
- f_a , a frequência de amostragem.

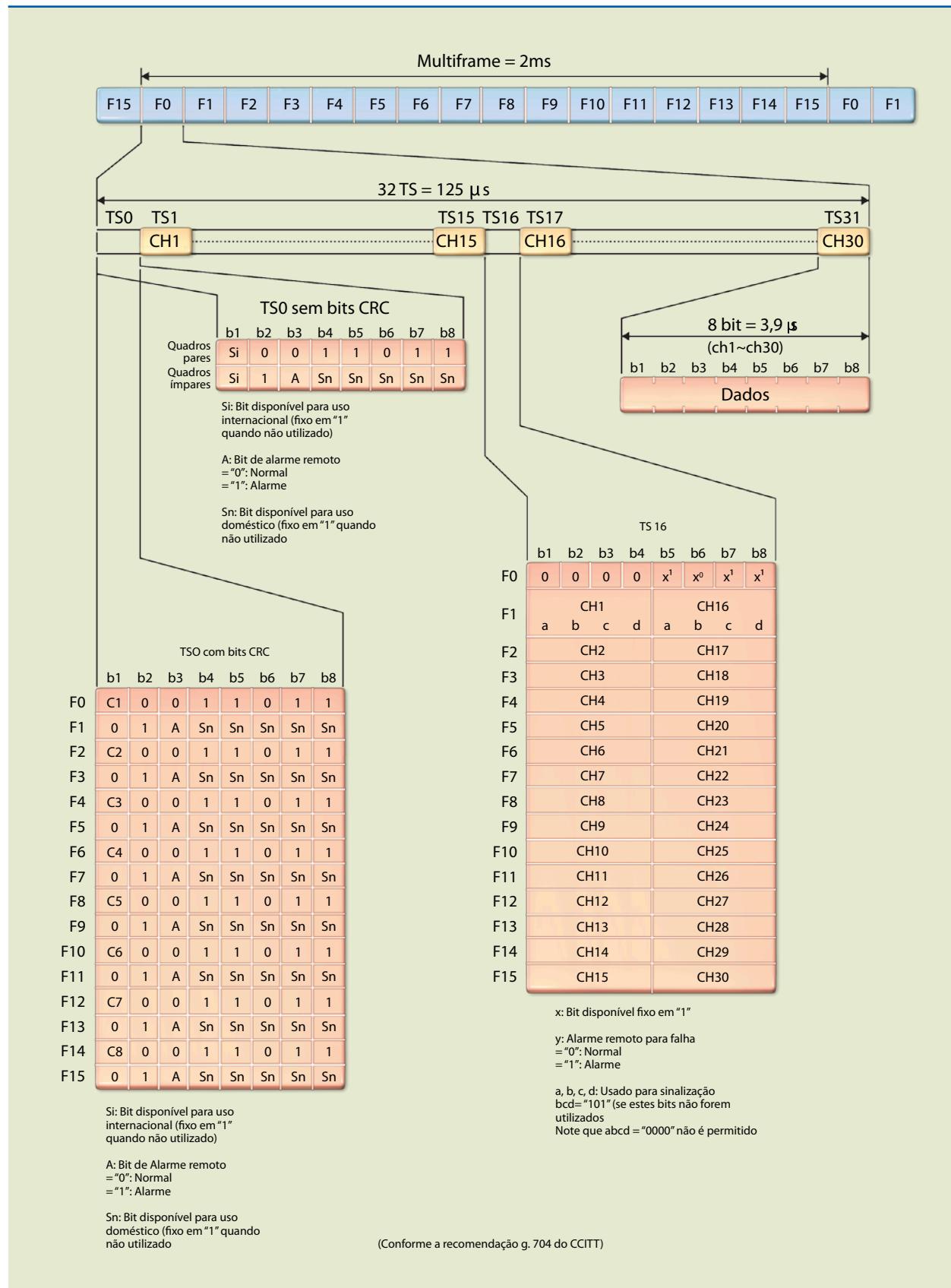
Logo:

$$f_b = 32 \cdot 8 \cdot 8 \text{ kHz} = 2048 \text{ kbps}$$

A figura 9.15 ilustra o processo para a formação de quadro, multiquadro e canal para um sistema PCM de 32 canais.

Figura 9.15
Estrutura de quadro, multiquadro e intervalo de tempo.





A tabela 9.1 mostra um resumo dos dados técnicos do PCM de 30 canais do sistema europeu.

Largura de faixa do canal	4 kHz
Frequência de amostragem	8 000 Hz
Número de bits da amostra	8
Tempo de transmissão de um quadro	125 µs
Canais de voz/quadro	30
Taxa de transmissão do quadro PCM	2,048 Mbps
Lei de codificação	Lei A
SCC nº 7 (IT 16)	64 kbps

Tabela 9.1
Resumo dos dados técnicos do PCM de 30 canais.

Capítulo 10

Redes de transporte de dados



As máquinas podem se comunicar, trocar dados ou transmitir bits de maneira assíncrona ou síncrona.

Na transmissão assíncrona, o intervalo entre uma informação e outra é imprevisível, daí o termo “assíncrona”, ou seja, intermitente. Criado para enviar caracteres conforme fossem teclados por operadores de telex, esse modo de transmissão consiste em inserir um símbolo no início e no fim da mensagem a ser enviada. Ele não atende a transmissões velozes, que implicam bits mais estreitos, ou seja, que duram menos tempo.

Na transmissão síncrona, as referências de tempo (relógio) do transmissor e do receptor precisam ser idênticas. É necessário um mecanismo de controle dos pulsos do relógio.

10.1 Rede PDH (hierarquia digital plesiócrona)

Limitações técnicas impediram que os primeiros sistemas multiplex fossem realmente síncronos, ou seja, eram quase síncronos ou plesiócronos. Uma máquina que multiplexa os enlaces E1 nessa rede trabalham com sinais gerados por equipamentos diferentes, cujo ritmo do sinal de saída pode estar ligeiramente diferente de 2,048 Mbps (mais rápido ou mais lento). Por isso, para que todos os enlaces estejam no mesmo ritmo, é preciso inserir bits de justificação, que serão descartados na demultiplexação dos enlaces E1. Esse processo é conhecido como operação plesiócrona (do grego *plésios* = próximo e *kronos* = tempo). Os problemas de sincronismo ocorrem em todos os níveis da hierarquia TDM, de maneira que em todos os estágios é necessária a justificação.

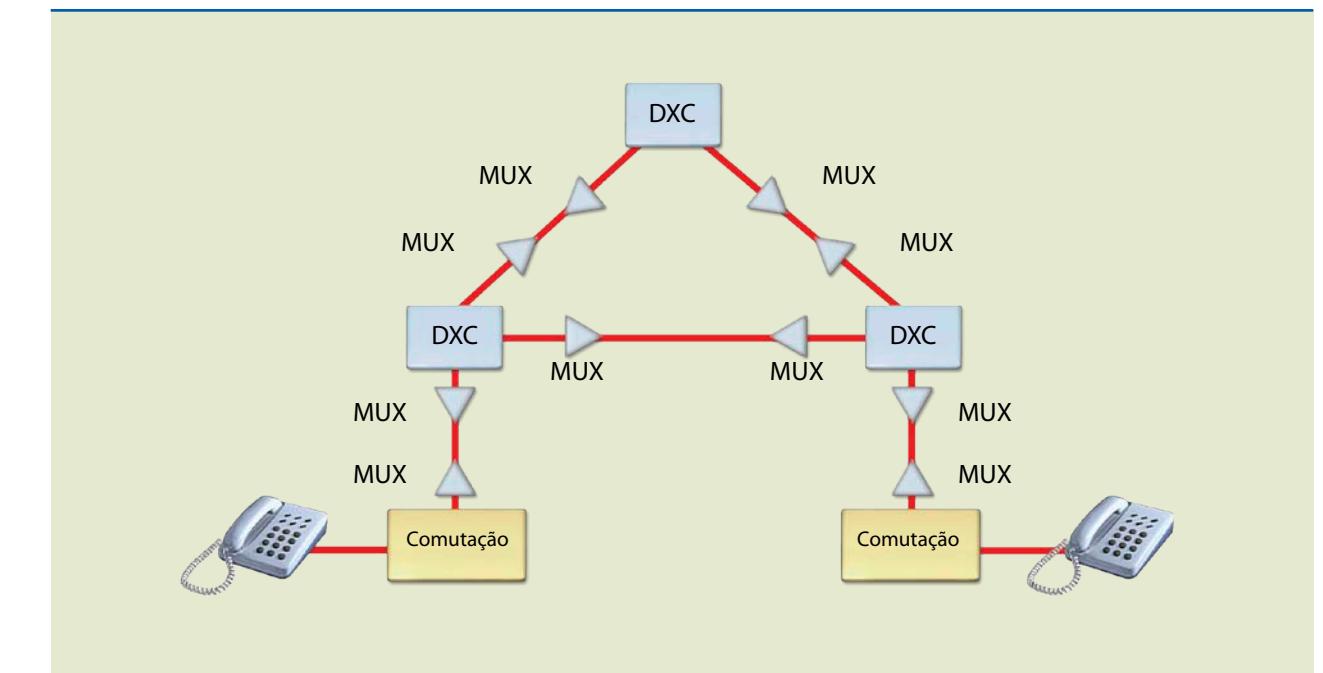
Com o avanço da tecnologia e a demanda por serviços de transmissão de dados, a rede PDH, projetada para atender apenas à telefonia, foi se tornando obsoleta, devido a sua estrutura de funcionamento.

Nas redes existentes, costuma-se usar a tecnologia de transmissão ponto a ponto para comutação de redes ou localidades de clientes. Por exemplo, um sinal a 64 kbps deve ser multiplexado até 2 Mbps e, após outros estágios de multiplexação, até 140 Mbps utilizando multiplexador (MUX) terminal. Entretanto, para comutar esse sinal de 64 kbps, todo o sinal de 140 Mbps deve ser demultiplexado. Para isso, é necessário um conjunto de multiplexadores em cada ponta do enlace de transmissão.

Tal situação também é observada em sistemas de transmissão por fibras ópticas. Esse arranjo se torna bastante caro quando, na prática, apenas alguns sinais de 64 kbps necessitam ser comutados.

A figura 10.1 apresenta uma aplicação para esse sistema.

Figura 10.1
Rede de transporte PDH.



Caso um cliente não necessite mais de um dos serviços oferecidos, o reprovisionamento e o rerroteamento consumiriam muito tempo e dinheiro, uma vez que os equipamentos teriam de ser realocados ou substituídos. Mesmo com sistemas de *cross-connect digital* (DXC), o rerroteamento de circuitos pode levar de alguns minutos a horas, dependendo dos métodos de controle.

Em resumo, os dois principais problemas da rede PDH são a dificuldade de identificar um enlace E1 específico em uma torrente de bits de alta velocidade e uma estrutura de quadro sem espaço para inclusão de informações de gerenciamento da rede.

Com a rede SDH, vista a seguir, toda a alocação de sinais e o roteamento da transmissão passam a ter controle centralizado, tornando simples o rerroteamento ou o reprovisionamento de circuitos.

10.2 Rede SDH (hierarquia digital síncrona)

Os sistemas síncronos podem ser encarados como o último estágio na hierarquia de transmissão, possibilitando a inserção e extração de enlaces sem a necessidade de demultiplexação. Em uma rede com perfeito sincronismo entre os enlaces, é possível saber exatamente a que enlace pertence cada bit, além de quando começa e termina o enlace, por meio de um gerenciamento centralizado da rede.

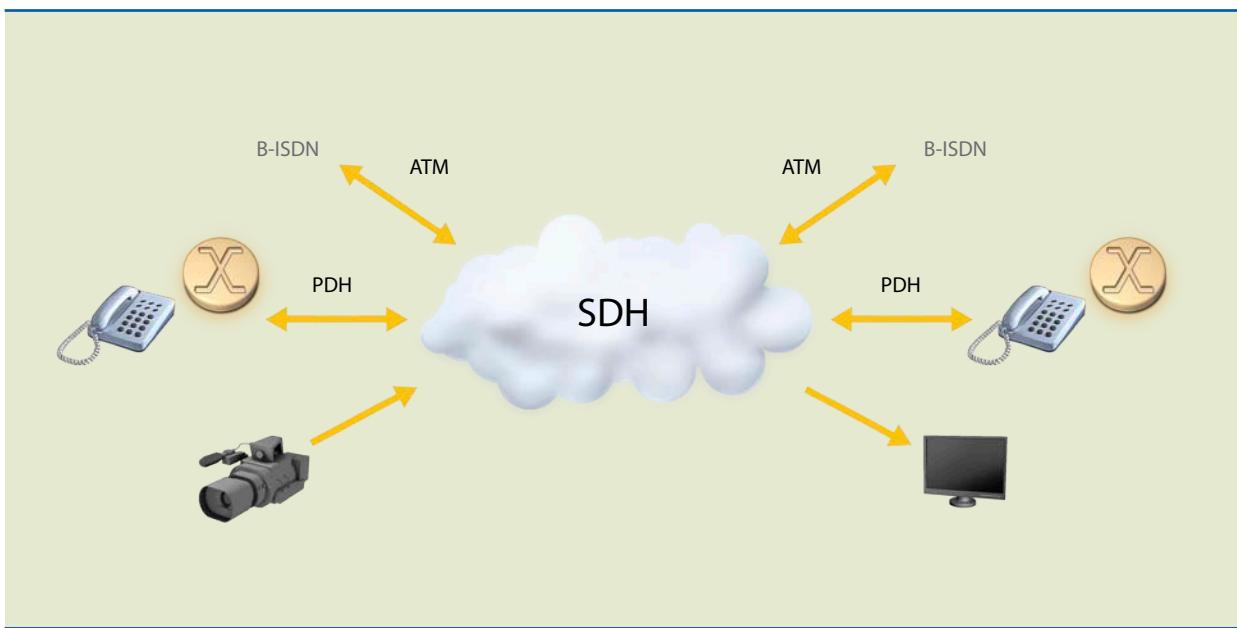


Os estudos sobre rede síncrona iniciaram-se na década de 1980 pela Bellcore, nos Estados Unidos, com o objetivo de criar uma interface-padrão para os sistemas de comunicação ópticos. A primeira rede, a SONET, tinha estrutura de quadro básica e taxa de 51,84 Mbits/s, apropriada para o transporte de sinais com taxa de 44,736 Mbits/s (DS3).

Em 1986, o ITU-T passou a realizar pesquisas com a finalidade de criar um padrão mundial para os sistemas de transmissão síncrona que proporcionasse aos operadores uma rede mais flexível e econômica. Surgiu, então, a rede SDH, que possui um quadro básico com estrutura/capacidade de transporte três vezes superior à SONET e com capacidade de transporte apropriada para o sinal E4 (139,264 Mbits/s).

Basicamente, a rede SDH é responsável por prover aos diversos serviços de telecomunicações o transporte de sinais digitais (figura 10.2).

Figura 10.2
Rede de transporte SDH.



Em relação à hierarquia PDH, a SDH apresenta as seguintes vantagens:

- **Melhor gerenciamento da rede** – Possibilita usar a rede de modo mais eficiente e fornecer melhores serviços aos usuários. Podem ser implementados conceitos de *telecommunications management network* (TMN).
- **Provisionamento mais rápido** – Como novos serviços podem ser definidos por meio de *softwares*, o provisionamento se dá de maneira muito mais rápida. A única nova conexão necessária estará entre as dependências do cliente e o nó de acesso à rede mais próximo.
- **Melhor utilização da rede** – Com total controle do roteamento, os circuitos dos usuários podem ser configurados a fim de obter melhor otimização dos recursos da rede.
- **Disponibilidade da rede** – Com a possibilidade de reroteamento da rede em tempo real, o sistema de suporte à operação da rede é capaz de eliminar

uma falha com a reprogramação das rotas. Os sistemas de proteção automática padronizados cuidam das falhas mais simples.

- **Atendimento a serviços futuros** – Serviços futuros de alta capacidade e sob demanda, ainda não padronizados, podem ser facilmente transportados na rede SDH. Em razão do total controle sob a alocação de recursos da rede, há facilidade de acesso aos tributários e criação de novos processos de mapeamento.

10.2.1 Capacidade de transporte da SDH

A SDH foi projetada para que suportasse a transmissão de quase todo o conjunto de sinais existentes ou dos mais importantes, nas atuais redes de comunicação. Entre os muitos sinais que já possuem o mapeamento definido estão:

- 2, 34, 140 Mbits/s.
- DS1, DS2, DS3 (EUA).
- ATM.
- FDDI
- DQDB.

No Brasil, as interfaces dos sinais FDDI e DQDB ainda não estão padronizadas, e os sinais DS1, DS2 e DS3 não serão padronizados por serem da hierarquia PDH norte-americana.

É importante enfatizar que, por causa das estruturas de transporte que a SDH possui, acredita-se que todo e qualquer sinal que possa vir a aparecer nos sistemas de telecomunicações poderá ser transportado pela SDH.

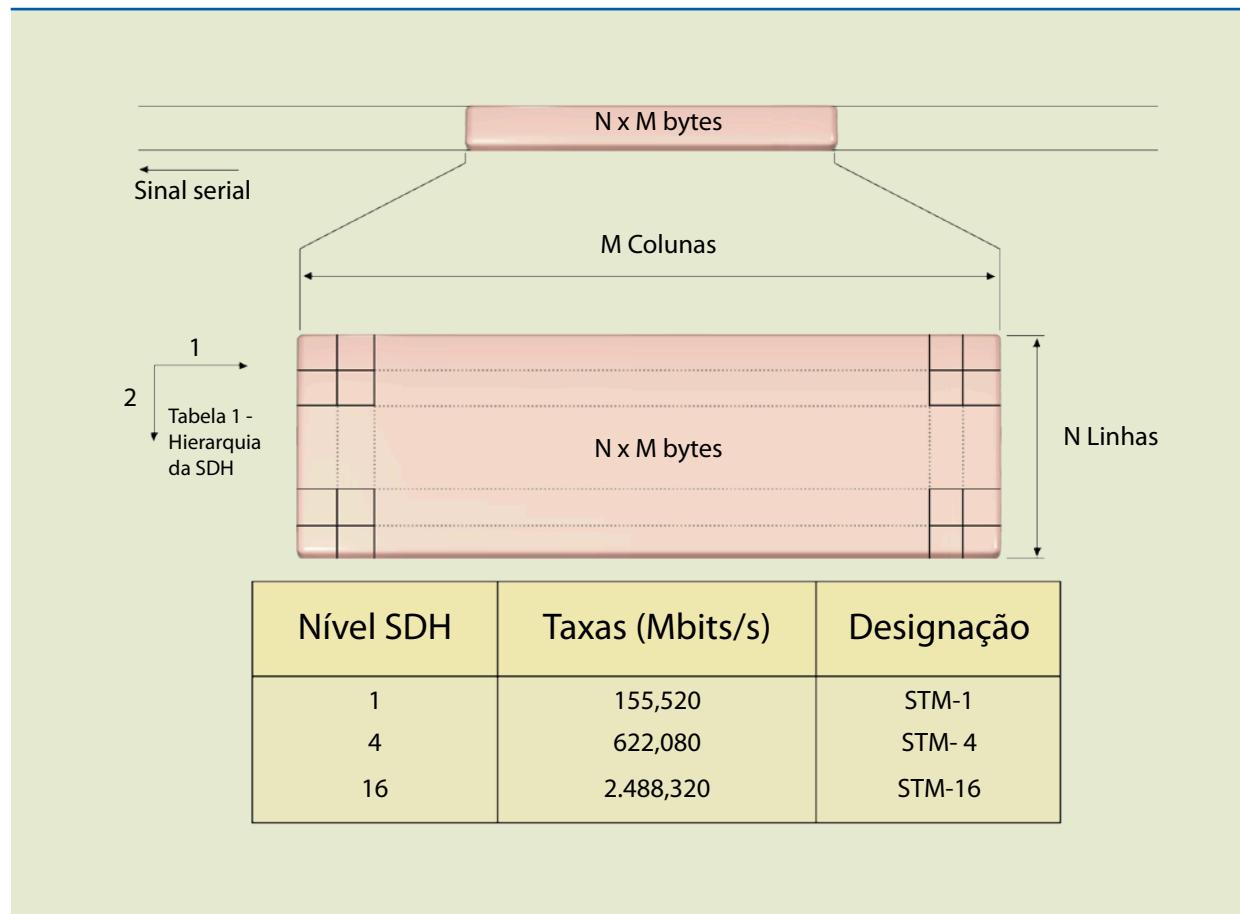
10.2.2 Módulo de transporte síncrono (STM)

Um quadro qualquer dentro do fluxo de bits pode ser representado por um mapa bidimensional, que possui N linhas e M colunas de caixas. Cada caixa representa um único byte dentro do sinal síncrono. O byte de enquadramento aparece no topo esquerdo do mapa, atuando como marcador, o que permite que qualquer byte no quadro seja facilmente localizado.

Os bits do quadro são transmitidos em sequência a partir da primeira linha da esquerda para a direita. Após a transmissão do último byte do quadro (byte localizado na linha N/coluna M), a sequência inteira se repete desde o byte de enquadramento do quadro seguinte.

Na SDH, há uma estrutura básica de transporte de informação denominada módulo de transporte síncrono – 1 (STM-1 – *synchronous transport module – 1*), com taxa de 155,520 Mbits/s. Essa estrutura define o primeiro nível da hierarquia. As taxas de bit dos níveis superiores são múltiplos inteiros do STM-1.

Atualmente estão padronizados três módulos de transporte: STM-1, STM-4 e STM-16 (figura 10.3). A especificação de níveis superiores a 16 ainda está em estudo.

**Figura 10.3**

Módulo de transporte síncrono SDH.

Para o sistema STM-1, estão definidas interfaces para transmissão por fibras ópticas e sistema rádio; para os sistemas STM-4, STM-16 e todos os níveis hierárquicos superiores, apenas interfaces para transmissão por fibras ópticas.

Há também uma estrutura de quadro com capacidade de transmissão mais baixa que a do STM-1, exclusivamente para uso em sistemas rádio e satélite. Denominada STM-0, essa estrutura possui taxa de 51,840 Mbit/s e não é considerada um nível hierárquico da SDH.

10.2.3 Estrutura de quadro do STM-1

A estrutura básica do quadro do STM-1, representada na figura 10.3, consiste de nove linhas de 270 bytes, lidos da esquerda para a direita e de cima para baixo. Esse quadro possui as seguintes características:

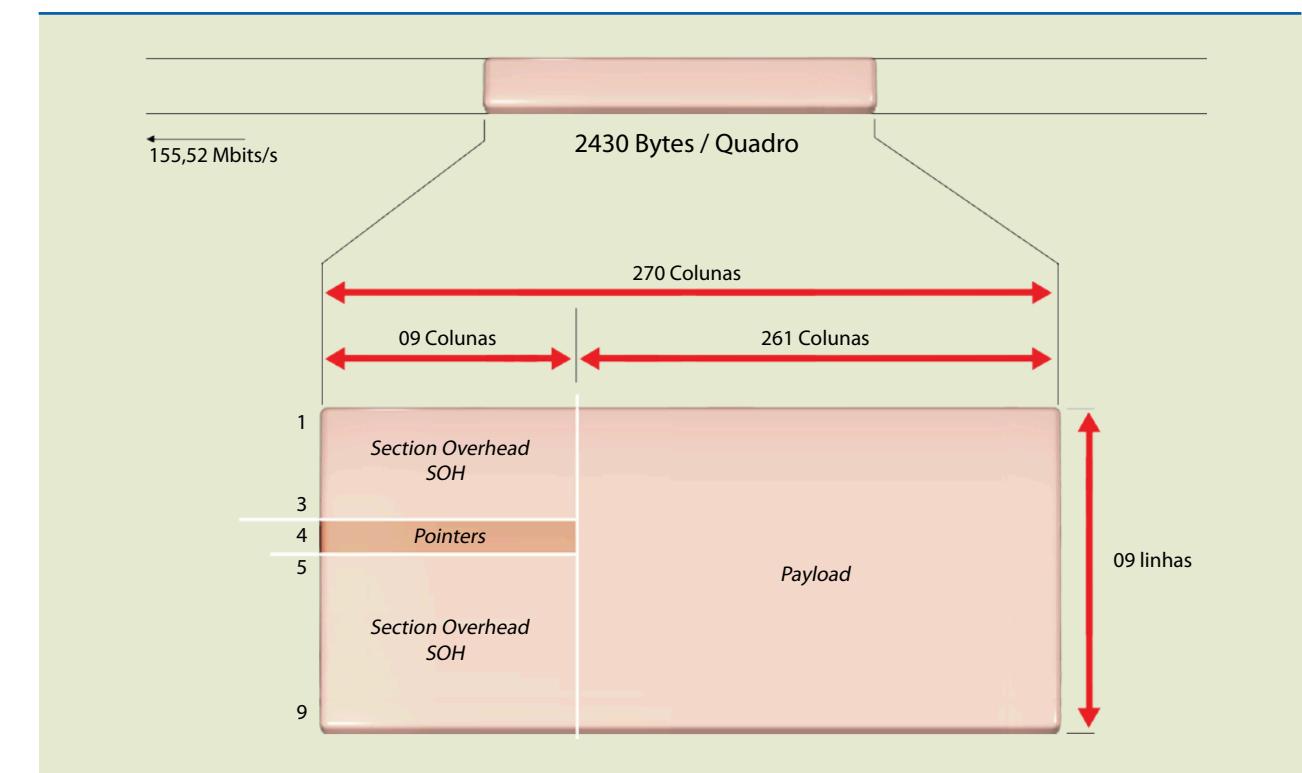
- Comprimento total: 2 430 bytes.
- Duração: 125 µs (frequência de repetição: 8 kHz).
- Taxa de bit: 155,520 Mbit/s.

Na SDH, os quadros se repetem a uma taxa de 8 000 quadros/s. Logo, 1 byte dentro do quadro representa uma largura de faixa de 64 kbit/s, que é a taxa de um canal de voz PCM.

A estrutura de quadro do STM-1, conforme mostra a figura 10.4, possui três áreas principais:

- **Section overhead (SOH)** – Localiza-se nas linhas 1 a 3 e 5 a 9 das colunas 1 a 9.
- **Ponteiro** – Situa-se na linha 4 e colunas 1 a 9.
- **Payload** – É aqui que será efetivamente carregada a carga útil. Ocupa as linhas 1 a 9 das colunas 10 a 270.

Figura 10.4
Estrutura de quadro do STM-1.



O *section overhead* ocupa as primeiras nove colunas do quadro em um total de 81 bytes. As 261 colunas restantes, em um total de 2 349 bytes, são alocadas para o *payload*. Isso garante uma capacidade de 150,34 Mbit/s na estrutura do STM-1 para transporte de sinais tributários (os diferentes sinais de entrada).

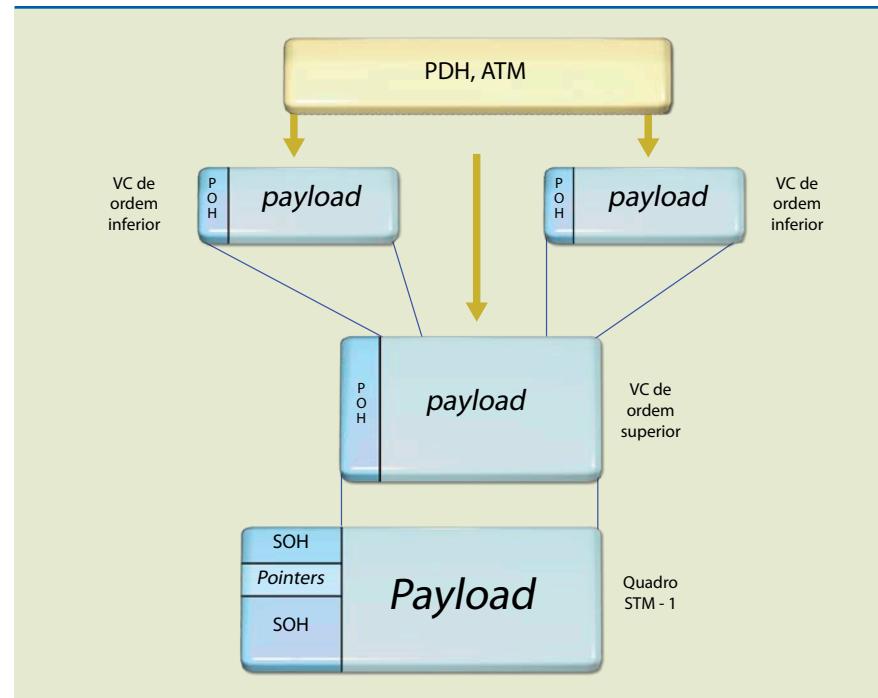
10.2.4 Princípios de transporte e multiplexação na rede SDH

O princípio do transporte de sinais digitais na rede SDH baseia-se na divisão da capacidade de transporte associada ao *payload* do quadro STM-N em contêineres virtuais (VCs – *virtual containers*) de ordem superior (alta capacidade) e de ordem inferior (baixa capacidade). Estes se chamam “contêineres” porque carregam a informação dos usuários da rede como carga útil e “virtuais” porque são entidades lógicas que existem apenas no quadro STM-N. A nomenclatura “ordem superior/inferior” refere-se à relação servidor/cliente que existe na SDH, dividindo a rede em camadas de via de ordem superior e de ordem inferior. Os VCs de ordem superior transportam os VCs de ordem inferior; são, portanto, servidores em relação a eles.

Os VCs são ainda divididos em áreas destinadas ao transporte do tributário que será transmitido, chamadas contêineres – C, e de um *overhead* de supervisão, denominado POH, que acompanha o tributário desde o ponto no qual ele é inserido na rede SDH até o ponto no qual é retirado dela (figura 10.5).

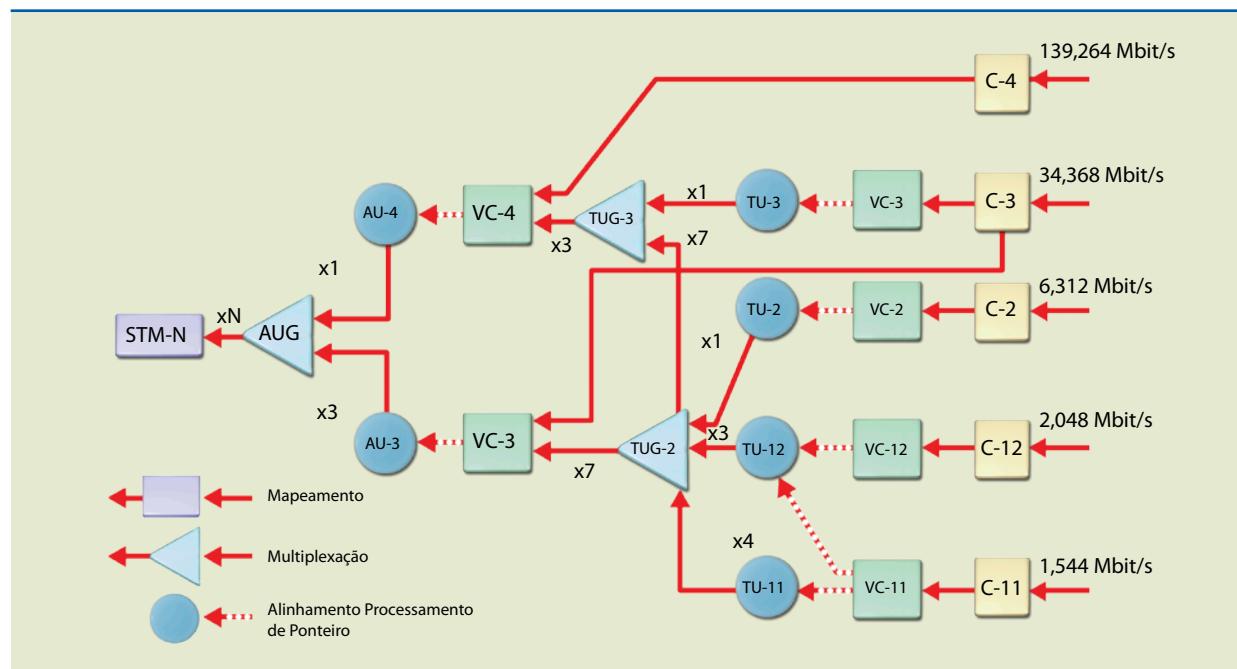
Figura 10.5

Multiplexação na rede SDH.

**Figura 10.6**

Estrutura de multiplexação na SDH.

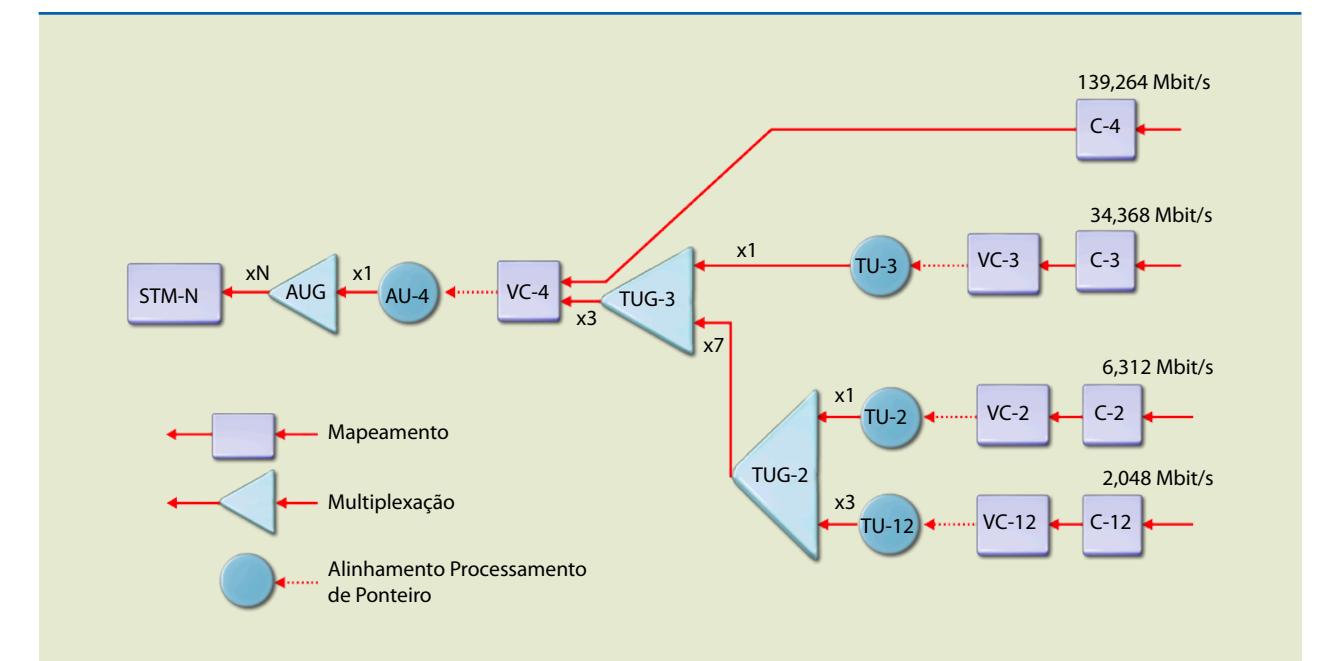
A hierarquia SDH apresenta a estrutura de multiplexação mostrada na figura 10.6. Essa estrutura foi padronizada pelo ITU e projetada de modo a ser possível transportar os sinais da hierarquia PDH, de maior importância em todo o mundo.



No Brasil, cuja rede PDH baseia-se na PDH europeia, a estrutura de multiplexação é mais simples, pois não são consideradas as interfaces para os sinais tributários DS1 e DS3 (padrão norte-americano). A interface para o sinal DS2 (norte-americano) tem sido estudada para o transporte de novos tipos de serviços para os quais nem sempre são possíveis e adequados os contêineres definidos para as taxas padronizadas na PDH europeia (figura 10.7).

Figura 10.7

Estrutura de multiplexação utilizada no Brasil.



10.2.5 Mapeamento de sinais na SDH

É o processo pelo qual os tributários são adaptados em VCs para serem transportados pela rede SDH. Pode ser considerado o processo que “interfaceia” os sinais digitais que serão transportados pela rede SDH. A adaptação se faz pela sincronização do tributário com a respectiva estrutura de transporte da SDH. Já estão definidos e padronizados pelo STB (*Superior Technologies in Broadcasting*) os mapeamentos dos sinais plesiócronos de 2, 34 e 140 Mbit/s e o mapeamento de sinais ATM.

Para o mapeamento de sinais plesiócronos, existe um tipo de contêiner (ou contêiner virtual) apropriado para cada nível hierárquico da PDH, definido pela SDH, que será responsável por seu transporte pela rede SDH. O processo de mapeamento poderá ser assíncrono ou síncrono, dependendo da relação entre os relógios do sinal tributário a ser mapeado e do equipamento SDH que realizará o mapeamento.

O **mapeamento assíncrono** é utilizado quando a referência de relógio do tributário é independente da referência de relógio do contêiner (ou do contêiner virtual). Na prática, ambos os relógios têm uma relação plesiócrona (apesar de possuírem a mesma frequência nominal, variam em torno dela). O mapeamento assíncrono pode ser aplicado em todos os sinais da PDH, definidos na

SDH, e o processo de sincronização se dá pela justificação de bit (da mesma forma que na PDH):

- **Justificação negativa** – Se a taxa de quadro do VC-n for maior que a do AU (unidade administrativa), conforme representado na figura 10.7, será necessário promover uma justificação negativa. O alinhamento de VC deve sofrer avanços periódicos no tempo, e o valor do ponteiro, ser decrementado de um. Essa operação é indicada pela inversão dos bits 8, 10, 12, 14 e 16 (bits D) da palavra do ponteiro, para permitir detecção de maioria de 5 bits na recepção. Três bytes de justificação negativa aparecem nos bytes H3 no quadro de AU-4, que contém os bits D invertidos. Os ponteiros subsequentes conterão o novo valor de *offset*.
- **Justificação positiva** – Se a taxa de quadro do VC-n for menor que a do AU, será necessário promover uma justificação positiva. O alinhamento do VC deve sofrer atrasos periódicos no tempo, e o valor do ponteiro, ser incrementado de um. Essa operação é indicada pela inversão dos bits 7, 9, 11, 13 e 15 (bits I) da palavra do ponteiro, para permitir detecção de maioria de 5 bits na recepção. Três bytes de justificação positiva aparecem imediatamente após o último byte H3 no quadro de AU-4, que contém os bits I invertidos. Os ponteiros subsequentes conterão o novo valor de *offset*.

Para o mapeamento dos sinais PDH de 2 e 34 Mbits/s, utiliza-se a justificação positiva/zero/negativa, uma vez que a capacidade nominal do VC, associada ao transporte de tributários, é igual à taxa de bits nominal dos tributários. Para o mapeamento dos sinais PDH de 140 Mbits/s, usa-se a justificação positiva, uma vez que a capacidade nominal do VC, associada ao transporte de tributários, é maior que a taxa de bits nominal dos tributários.

Para a realização de **mapeamentos síncronos**, é necessário que o relógio do sinal tributário a ser mapeado seja o mesmo do equipamento SDH. Para isso, os tributários são criados como *links*, de canais digitais de 64 kbytes/s, para o equipamento SDH. O mapeamento síncrono torna-se muito interessante quando os tributários possuem estrutura de quadro que permita o delineamento de seus canais de 64 kbytes/s, como é o caso do sinal de 2 Mbytes/s.

10.3 Modelo da rede de transporte

O ITU-T subdividiu a rede de transporte SDH em três camadas:

- Camada de circuito (*circuit layer network*).
- Camada de via (*path layer network*).
- Camada do meio de transmissão (*transmission media layer network*).

Existe uma relação servidor/cliente entre essas camadas, e cada uma delas tem os próprios procedimentos de operação, administração, manutenção e provisionamento.

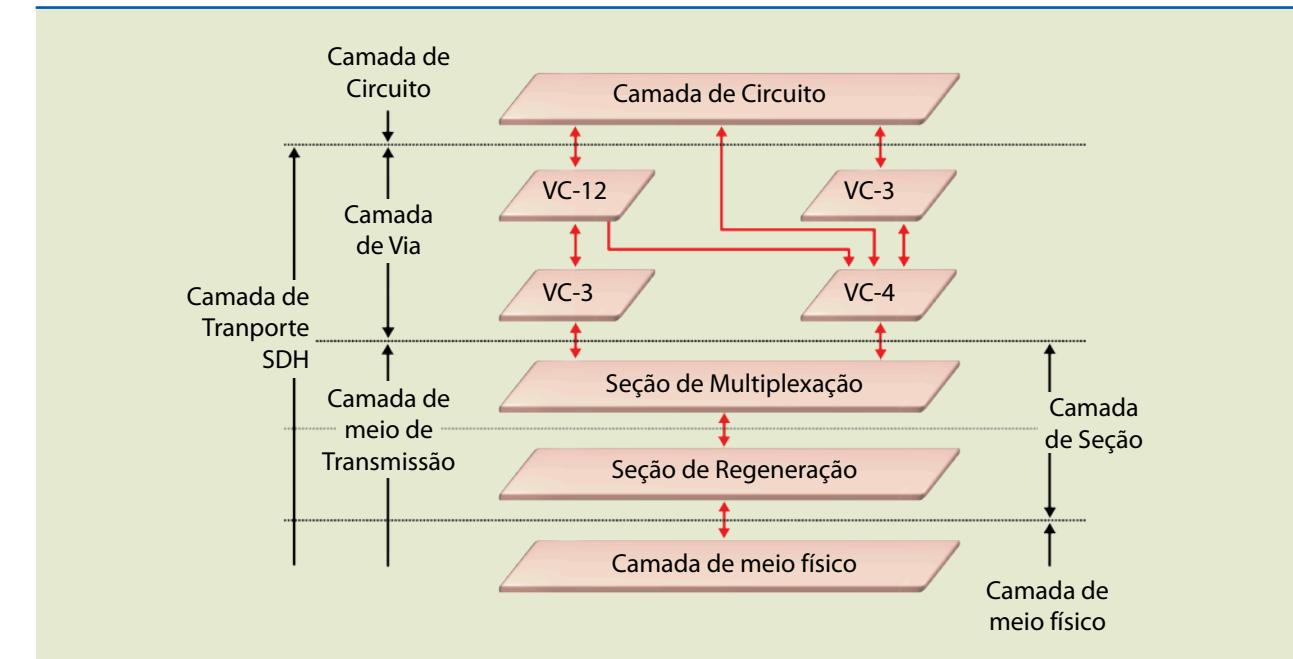
A **camada de circuito** fornece aos usuários serviços de telecomunicações como comutação de circuitos e de pacotes. Diferentes camadas de circuito podem ser identificadas de acordo com os serviços fornecidos.

A **camada de via** é utilizada para dar suporte aos diferentes tipos de camadas de circuito. Na SDH, existem dois tipos: a camada de via de ordem inferior (*lower-order path layer network*) e a camada de via de ordem superior (*higher-order path layer network*). A monitoração dessa rede de camada é feita pelo POH (*path overhead*) de ordem inferior ou de ordem superior. A camada de via é responsável pela transmissão do tributário desde o ponto no qual ele é montado em um contêiner (VC-n ou VC-m) até o ponto no qual é desmontado.

A **camada do meio de transmissão** é dividida em camada de seção (*section layer network*) e camada do meio físico (*physical media layer network*). A camada de seção se ocupa de todas as funções para a transferência de informação entre dois nós na camada de via. A camada do meio físico se ocupa do meio de transmissão (fibra óptica, rádio ou par metálico), servindo a camada de seção. Na SDH, existem dois tipos de camada de seção: a de multiplexação, para a transmissão fim a fim da informação entre locais que acessem (roteiem ou terminem) a via, e a de regeneração, para a transmissão de informação entre regeneradores e entre regeneradores e locais que acessem as vias.

A figura 10.8 apresenta a relação das camadas da rede de transporte SDH.

Figura 10.8
Camadas da rede de transporte SDH.



10.4 Arquiteturas SDH

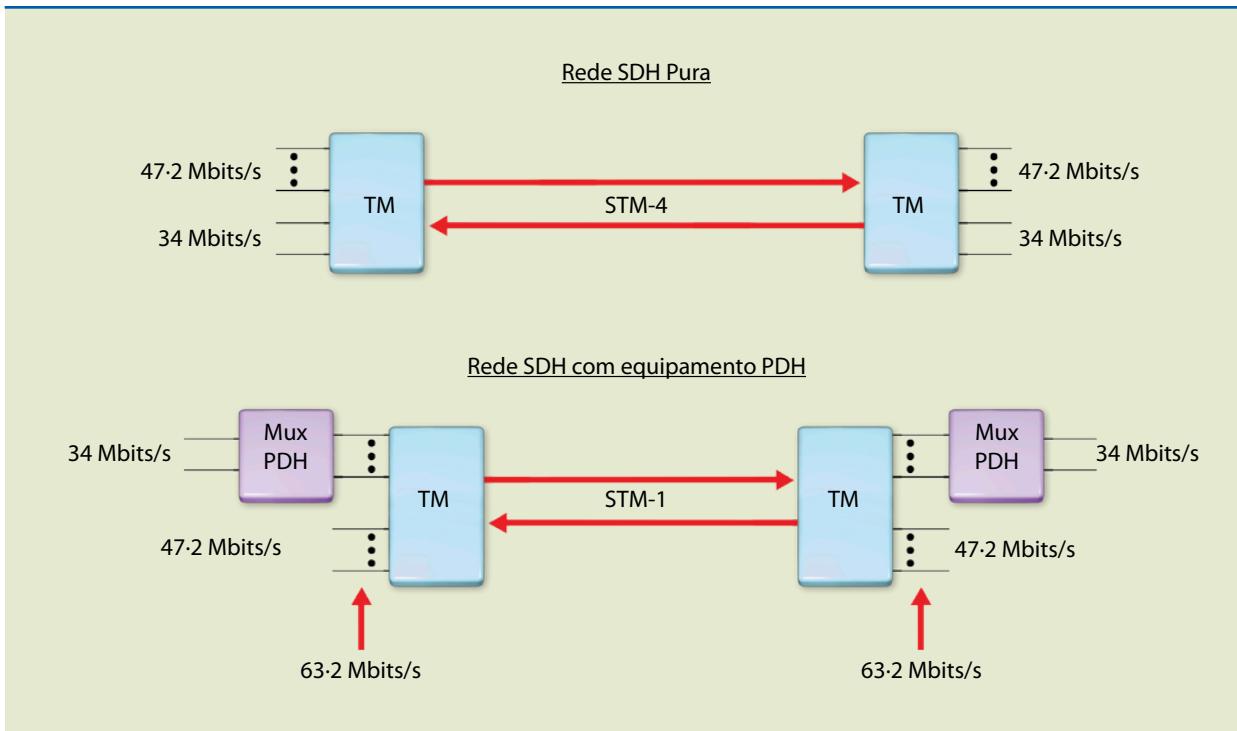
Basicamente há dois tipos de configuração: a rede ponto a ponto e a rede em anel.

10.4.1 Rede ponto a ponto

Nessa configuração, dois MUX SDH funcionam como rota de alta velocidade entre duas localidades (figura 10.9). As duas interfaces de saída desempenham as

funções de enlace principal e reserva. Projetados como estações de inserção e extração de tributários, os MUX SDH operam como entrepostos, alterando o conteúdo do sinal do STM-N entre duas estações, conhecidas como ADM (*add and drop multiplexer*).

Figura 10.9
Redes SDH ponto a ponto.



10.4.2 Rede em anel

Nessa configuração, cada nó da rede é conectado a dois nós adjacentes por uma comunicação duplex, formando, assim, uma arquitetura na qual a comunicação entre dois nós não adjacentes passa por nós que não a originaram ou à qual não se destinam.

As redes em anel são classificadas de acordo com o sentido do tráfego e a forma como implementam os mecanismos para o aumento da disponibilidade por meio da estratégia de proteção. Essas duas classificações levam a uma terceira: o número de fibras que formará o anel. São exemplos de redes em anel:

- **Redes unidireccionais/dúas fibras** – Nessas redes, o tráfego principal entre nós é transportado em apenas um sentido (horário ou anti-horário) pela fibra principal. A figura 10.10 mostra que o transporte do tráfego principal do nó A para o nó C ocorre no sentido horário, passando pela rota A-B-C, e que o do tráfego do nó C para o nó A também se dá no sentido horário, passando pela rota C-D-A. O tráfego de proteção é transportado no sentido contrário ao do tráfego principal pela fibra de proteção. Os tráfegos principal e de proteção são enviados ao mesmo tempo e a seleção, no nó remoto, do tráfego principal para o de proteção é realizada por meio da monitoração e detecção de alarmes locais no equipamento remoto.

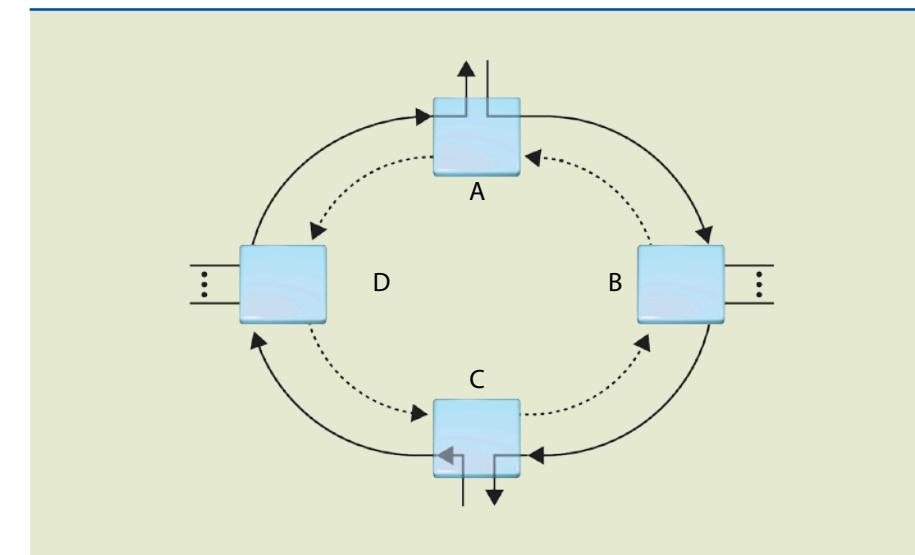


Figura 10.10
Anel unidirecional.

- **Redes bidirecionais/quatro fibras** – Nessas redes, há entre os nós dois pares de fibras, um dedicado ao tráfego principal e o outro dedicado ao tráfego de proteção, além de dois equipamentos ADM (figura 10.11). O par de fibras de proteção poderá ser utilizado para o transporte de tráfego extra não prioritário (será descartado na atuação da proteção).

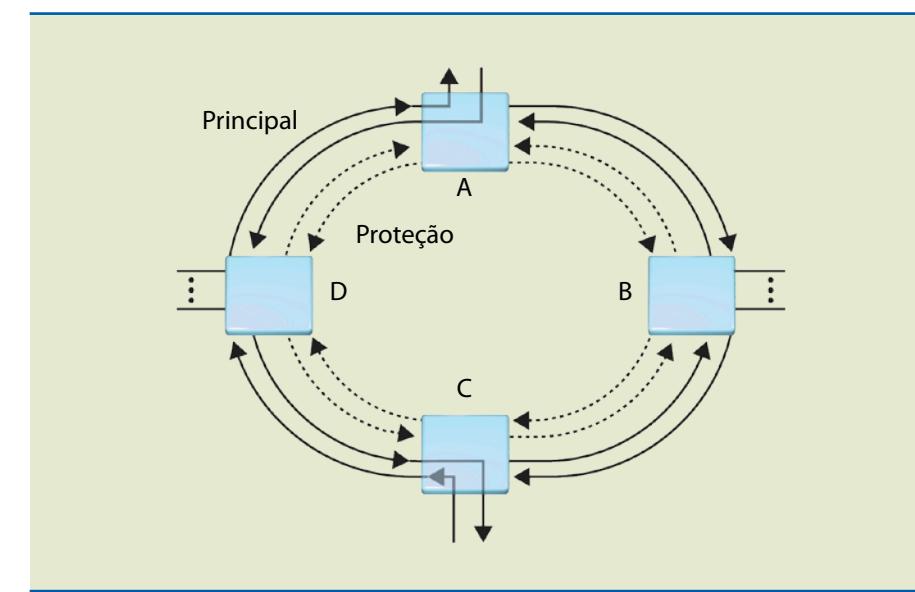


Figura 10.11
Anéis bidirecionais.

As redes em anel e ponto a ponto são as mais comuns, porém também costumam ser utilizadas as configurações em estrela e em malha.

Capítulo II

Comunicações ópticas

A transmissão de informações por fibras ópticas tem sido cada vez mais utilizada em redes de telefonia e de dados, uma vez que as fibras são superiores aos cabos metálicos e enlaces de rádio quanto a capacidade, confiabilidade e atenuação.

O crescente desenvolvimento da tecnologia no processo de fabricação das fibras ópticas, além de reduzir os custos de implantação, as tornou o único meio de transmissão compatível em banda com novos equipamentos e tecnologias usados em telecomunicações.

A fibra óptica é formada por um núcleo, no qual a luz é transmitida, e uma casca, que confina a luz no interior do núcleo. É composta de material dielétrico, em geral o vidro, e tem a forma de um filamento cilíndrico com diâmetro comparável ao de um fio de cabelo.

III.1 Vantagens das fibras ópticas

Muitos atributos fizeram dos sistemas de transmissão por fibra óptica um dos meios mais utilizados em telecomunicações:

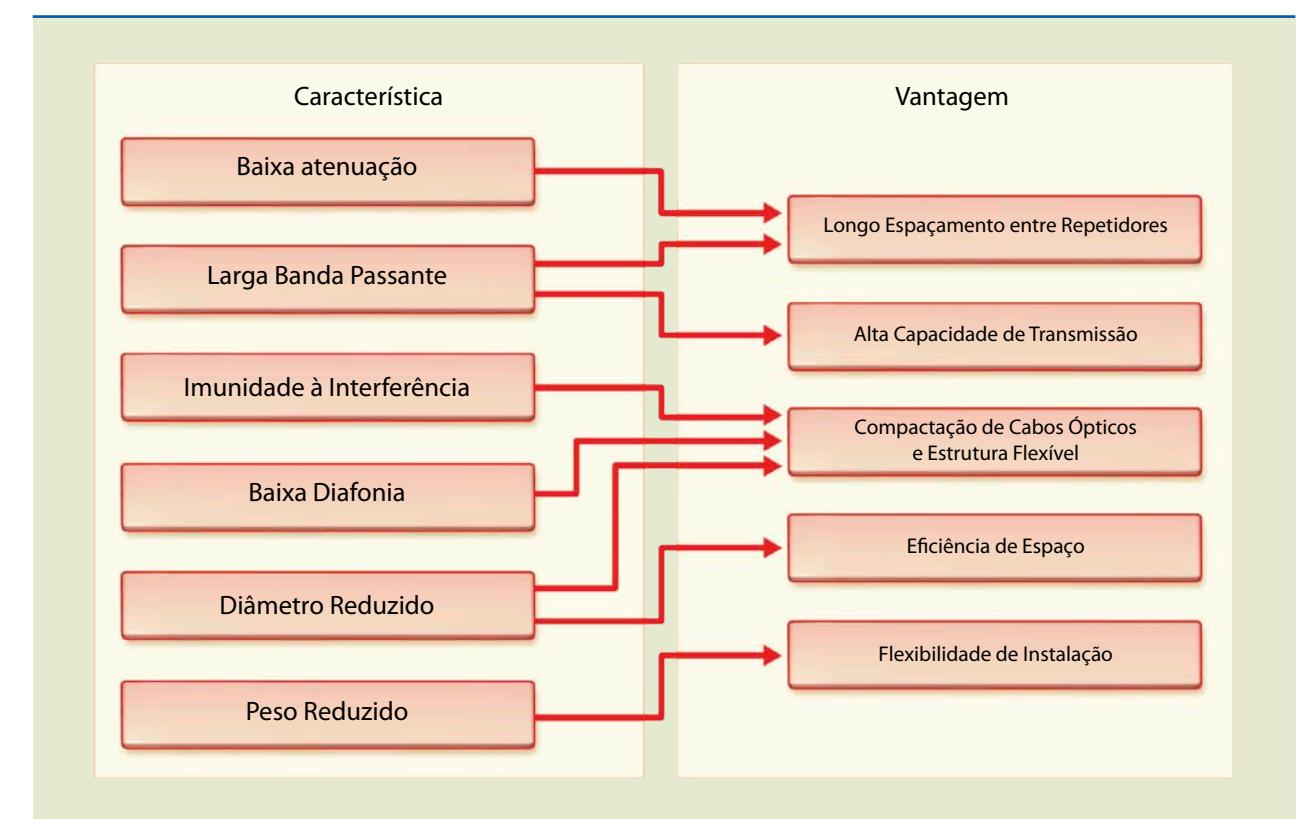
- **Alta capacidade** – Hoje as fibras podem transportar dados na ordem de Gbps, porém estão sendo testadas em laboratórios especializados fibras com capacidade de transporte mil vezes superior. As fibras de alta capacidade permitem um uso mais flexível da banda de transmissão para os serviços existentes e provavelmente para os que surgirão.
- **Alta confiabilidade** – Deve-se à existência de sistemas que utilizam fibras ópticas comerciais com taxa de erro de bit (TEB) menor que 10^{-11} . Os meios de transmissão por fibra óptica estão livres de interferências eletromagnéticas, além de não serem afetados por variações climáticas.
- **Longo espaçamento entre repetidores** – Sistemas com fibras ópticas disponíveis comercialmente podem transmitir dados por cerca de 100 km sem a necessidade de regeneração do sinal (com o desenvolvimento de fibras com melhor qualidade, essa distância tende a aumentar). Os sistemas de transmissão que utilizam cabos metálicos necessitam, em média, de um repetidor a cada 1,5 km (para 2 Mbps).
- **Grande segurança** – Sistemas de transmissão por fibra óptica são extremamente seguros no que diz respeito ao sigilo das informações. Tal característica se deve ao fato de esses sistemas não provocarem indução de energia

externa. Além disso, desde que os níveis de potência sejam cuidadosamente monitorados, qualquer perda de sinal pode ser detectada quase de imediato. Por esses motivos, sistemas com fibras são bastante aplicados em comunicações militares e bancárias.

- **Tamanho e peso (massa) reduzidos** – Cerca de 1,5 km de cabo de cobre tem massa de aproximadamente 500 kg. Considerando a seção equivalente por fibra, a massa diminuiria cerca de 75%. Além disso, os cabos de fibra óptica são finos, o que viabiliza, quase sempre, sua instalação em dutos existentes.
- **Potencial de crescimento ilimitado** – As fibras possuem alto potencial de crescimento, pois sua capacidade é limitada não por suas características técnicas, mas por características dos equipamentos óptico-eletrônicos instalados.
- **Baixo custo do sistema** – O argumento econômico para uso dos sistemas com fibras ópticas é o fato de que grande volume de dados pode ser transportado com pequeno número de fibras, maior espaçamento entre os repetidores e baixo custo de manutenção.

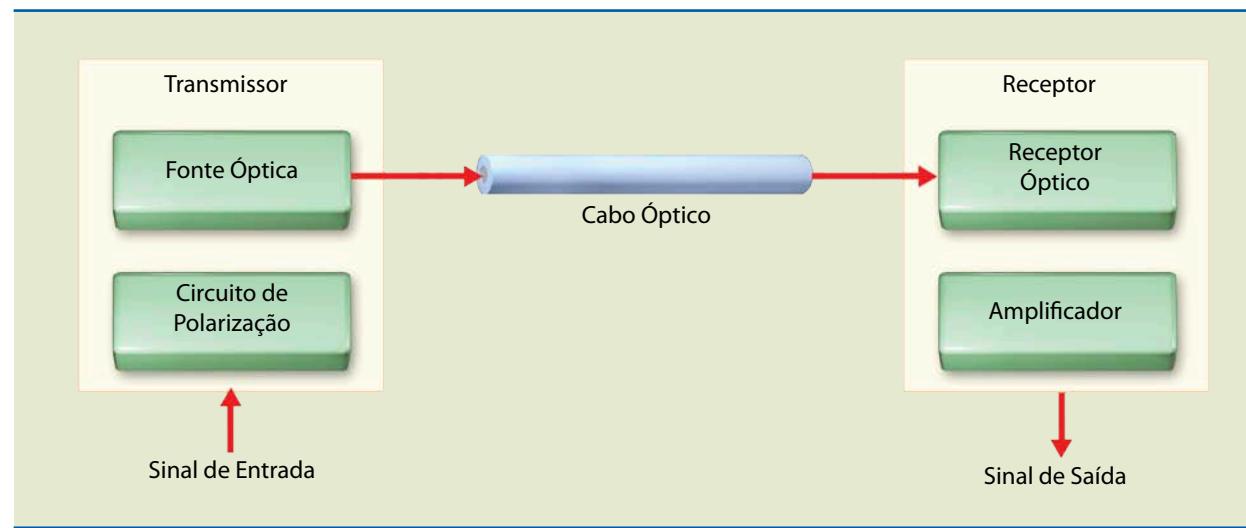
A figura 11.1 apresenta um resumo das características do sistema de transmissão por fibra óptica.

Figura 11.1
Características do sistema de transmissão por fibra óptica.



III.2 Composição do sistema óptico

Um sistema de telecomunicações com fibras ópticas é constituído essencialmente de três dispositivos: transmissor óptico, cabo de fibra óptica e receptor óptico (figura 11.2).

**Figura 11.2**

Composição típica de um sistema óptico.

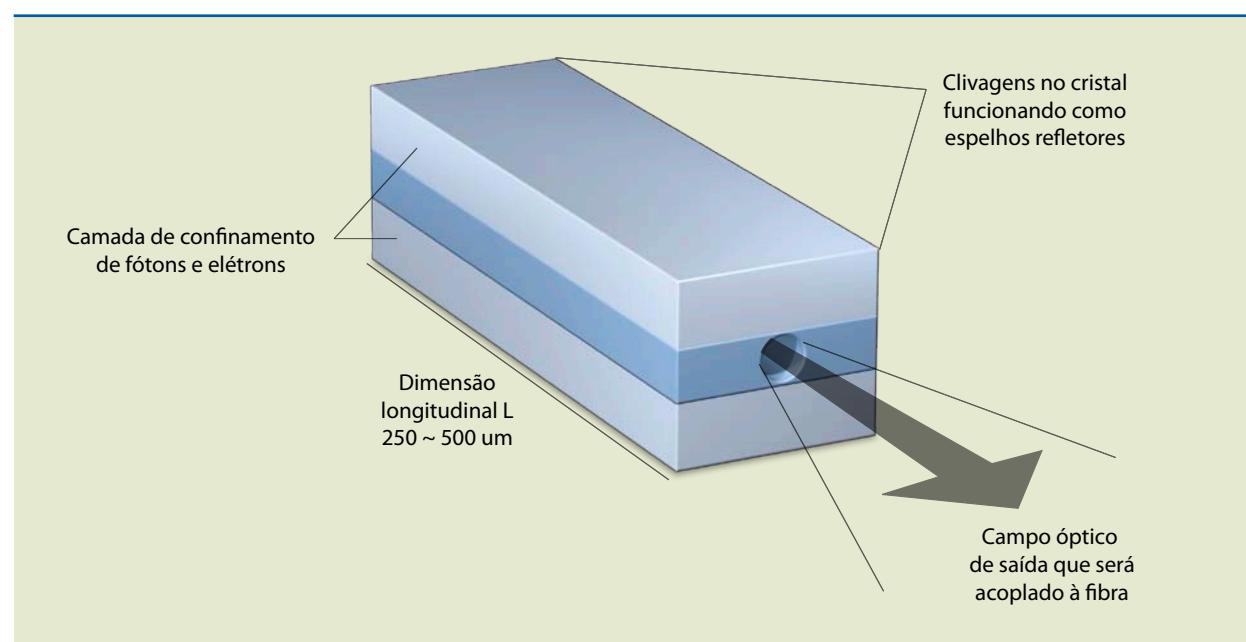
Um transmissor óptico é composto basicamente de um circuito de polarização e um dispositivo emissor de luz, responsável pela conversão do sinal elétrico de entrada em um sinal óptico. Dois tipos de fontes ópticas compõem a maioria dos sistemas de transmissão por fibra óptica: o diodo emissor de luz e o diodo *laser*.

O diodo emissor de luz (LED – *light emitting diode*) é a fonte óptica mais simples e barata utilizada em telecomunicações. É usado em sistemas de transmissão de baixa capacidade devido a limitações de acoplamento, largura de espectro e velocidade de modulação.

O diodo *laser* (*light amplification by stimulated emission of radiation*) é mais caro que os LEDs, possui maior potência de saída e transmite em altas taxas (da ordem de Tbps em laboratório) e grandes distâncias. Seu princípio de funcionamento se baseia na emissão estimulada de luz (figura 11.3).

Figura 11.3

Diodo *laser* típico.



Um *laser* típico emite luz em vários comprimentos de onda, o que, dependendo de sua aplicação, pode não ser interessante. Várias estruturas foram desenvolvidas com o intuito de operar em apenas um modo longitudinal, introduzindo seletividade ao funcionamento do dispositivo.

Nos receptores ópticos, os dispositivos responsáveis pela transformação do sinal óptico recebido em um sinal elétrico o mais parecido possível com o original são os fotodetectores. Seu funcionamento é baseado na fotoionização do material semicondutor, em que a energia do fóton retira elétrons da banda de valência, levando-os para a banda de condução.

Nos LEDs, a junção PN é diretamente polarizada para gerar luz. Nos **fotodiodes PIN**, o processo é inverso: conecta-se o lado P da junção a um potencial elétrico inferior ao do lado N. O resultado é uma atração de elétrons e lacunas para longe da junção (região ativa), dando origem a uma região com poucos portadores de carga (região esvaziada). Por meio da fotoionização, os fôtons geram portadores de carga que deverão ser movimentados por um campo elétrico e coletados para produzir corrente.

Aumentando o valor da tensão reversa aplicada no diodo, pode-se gerar uma corrente secundária, fazendo surgir novos pares elétrons-lacunas por colisões entre portadores de carga acelerados pelo campo elétrico. Os pares criados originam, por sua vez, novos portadores, em um processo conhecido por avalanche.

Os **fotodiodes de avalanche (APD)** são constituídos em um processo mais complexo, de três camadas, e podem ter sua eficiência e rapidez comprometidas quando submetidos a tensões de polarização inferiores às nominais (figura 11.4).

Figura 11.4

Fotodiodo de avalanche típico.



A tabela 11.1 compara as características do PIN com as do APD.

CARACTERÍSTICAS	PIN	APD
Sensibilidade	Menor	Muito maior
Linearidade	Maior	Menor
Relação sinal/ruído	Pior	Melhor
Custo	Baixo	Alto

Tabela 11.1

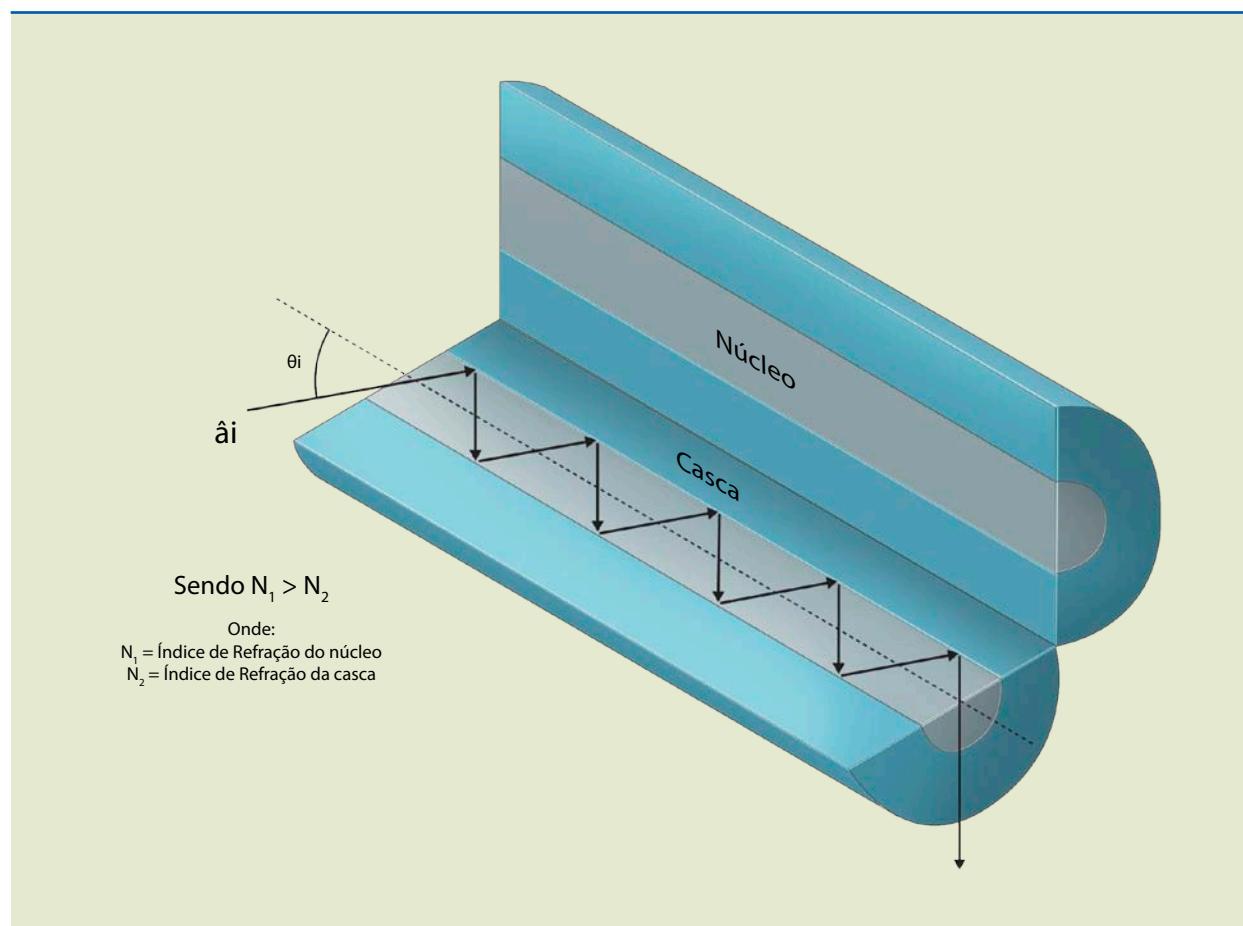
Quadro comparativo entre PIN e APD.

CARACTERÍSTICAS	PIN	APD
Vida útil	Maior	Menor
Variação das características com a variação da temperatura	Menor	Maior
Circuitos de polarização	Simples	Complexo

11.3 Fibras ópticas

Nas fibras ópticas (figura 11.5), o feixe luminoso parte do transmissor ao receptor, aproveitando-se das propriedades de reflexão da luz ao incidir nas fronteiras que separam meios com índices de refração diferentes (núcleo/casca).

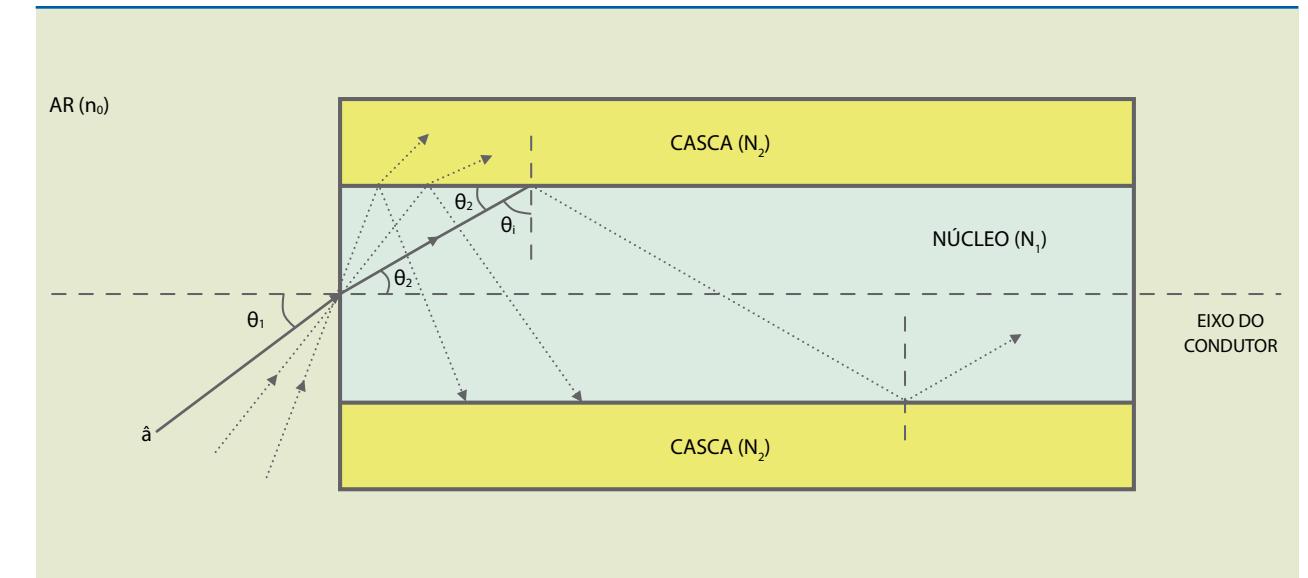
Figura 11.5
Constituição da fibra óptica.



O material da casca geralmente é sílica pura (SiO_2), com índice de refração n_2 . Para o núcleo, utiliza-se sílica dopada com óxidos de elementos químicos, com índice de refração $n_1 > n_2$. Os elementos mais utilizados na dopagem são o germânio (Ge) e o fósforo (P). A diferença de índice de refração entre núcleo e casca varia de 10^{-3} a 10^{-2} .

Abertura numérica (AN) é um parâmetro que representa o ângulo máximo de aceitação (θ_1) de um raio luminoso, em relação ao eixo da fibra, para que ocorra reflexão interna total na fronteira núcleo/casca dessa fibra (figura 11.6).

Figura 11.6
Reflexão total e refração no interior de uma fibra óptica.



Pela figura, aplicando as leis da refração, temos:

$$\sin \theta_1 = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \Rightarrow \sin \theta_1 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = AN \quad (11.1)$$

em que:

- n_1 é o índice de refração do núcleo;
- n_2 , o índice de refração da casca;
- θ_1 , o ângulo de aceitação.

A figura 11.6 mostra o ângulo de aceitação (θ_1), que está relacionado com a abertura numérica (AN).

Um raio luminoso proveniente de uma fonte externa incide sobre o núcleo da fibra segundo um ângulo θ_1 em relação ao seu eixo. Devido à refração que ocorre na fronteira ar/núcleo, o raio propaga-se no interior da fibra segundo o ângulo θ_2 , o mesmo ângulo formado com a superfície da casca. Se este ângulo θ_2 for maior do que o ângulo crítico, ou seja, se o ângulo θ_i (ângulo de incidência formado com a normal à superfície da casca) for menor que o ângulo crítico, não haverá reflexão total: uma parte será refratada (absorvida) para a casca.

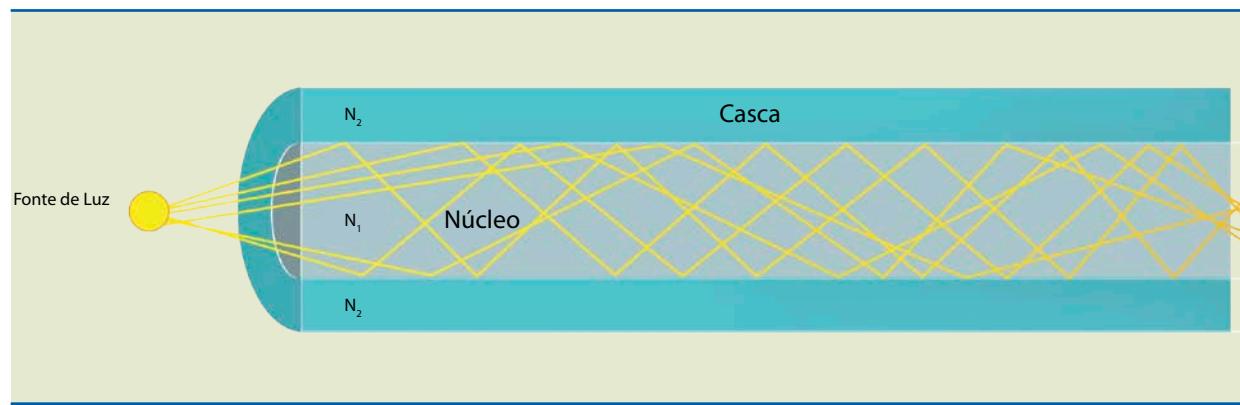
De um modo geral, essas ondas refratadas representam uma perda de potência óptica, uma vez que não farão parte da luz guiada pela casca.

O máximo ângulo de acoplamento θ_1 denomina-se ângulo de aceitação do condutor de fibra óptica e é função unicamente dos índices de refração do núcleo e da casca da fibra. O seno do ângulo de aceitação denomina-se Abertura Numérica (AN), conforme indica a equação 11.1.

Na prática, o conhecimento da AN é importante para se determinar a eficiência do acoplamento da luz com os condutores de fibra óptica. A fibra óptica funciona como um guia de ondas e, nesse caso, a teoria clássica estabelece que para um determinado comprimento de onda, existe uma quantidade máxima de modos que podem propagar-se. Cada modo corresponde a um valor determinado de q_2 , ângulo formado com a superfície da casca (figura 11.7), característico de cada raio que penetra na fibra.

Figura 11.7

Modos de propagação no interior da fibra óptica.



A frequência normalizada da fibra é dada por:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot AN \quad (11.2)$$

em que:

- a é o raio do núcleo da fibra;
- λ , o comprimento de onda da luz;
- AN , a abertura numérica da fibra.

O índice de refração n é dado por:

$$n = \frac{V^2}{2} \cdot \frac{\alpha}{\alpha + 2} \quad (11.3)$$

em que α é um parâmetro que depende do tipo de fibra.

Dessa maneira, para uma luz de comprimento de onda λ , a quantidade de modos guiados que uma fibra pode transportar está relacionada com uma quantidade adimensional.

Como se pode perceber, o número de modos de propagação da luz na fibra (uma vez especificada a abertura numérica desta) é diretamente proporcional a seu diâmetro.

11.4 Dispersão nas fibras ópticas

Quando um impulso luminoso viaja ao longo de uma fibra óptica, ele se alarga em função do comprimento da fibra. Esse alargamento determina a banda passante da fibra e, consequentemente, a capacidade de transmissão da informação, pois, se houver alargamento excessivo dos impulsos, eles não poderão mais ser distinguidos no outro extremo.

Tal fenômeno é causado por dois efeitos principais: dispersão material ou cromática e dispersão modal.

A **dispersão material ou cromática** é originada pela variação da velocidade de propagação da luz no núcleo, decorrente do espectro de frequência do sinal luminoso. Pode-se dizer que, se o feixe luminoso possui certa largura espectral ($\Delta\lambda$), ocorrem diferenças no tempo de propagação, pois o índice de refração do núcleo diminui com o aumento do comprimento de onda, fazendo com que os diversos componentes do espectro luminoso viajem com velocidades diferentes.

Levando em conta apenas a dispersão material, é oportuno operar um sistema óptico em $1,3 \mu\text{m}$ para aumentar a banda passante.

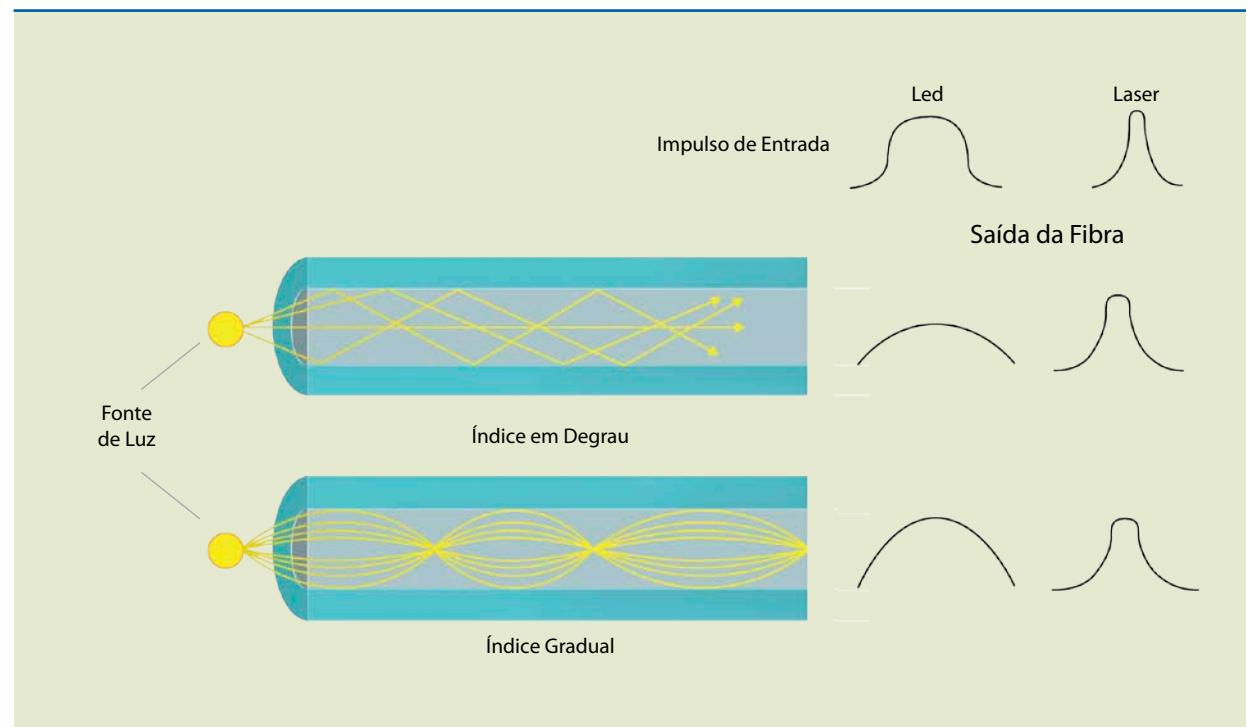
Considerando uma fibra na qual existem vários modos transportando potência, cada um desses modos percorrerá um caminho de propagação, em um tempo, consequentemente, proporcional ao percurso (**dispersão modal**).

Se não for considerada a dispersão material, todos os modos terão a mesma velocidade de propagação, pelo fato de o índice de refração ser constante para todos os pontos do núcleo. Dessa maneira, existirá uma diferença máxima nos tempos de percurso da fibra entre o modo que se propaga exatamente pelo eixo da fibra e aquele que penetrou com o ângulo crítico, percorrendo um caminho mais longo. Portanto, um impulso luminoso estreito que incide em uma fibra terá sua potência luminosa distribuída entre vários modos de propagação. Apesar de todos partirem ao mesmo tempo no início da fibra, chegarão ao final em instantes diferentes. Isso ocorre devido aos diversos caminhos percorridos, alargando o impulso de saída e, portanto, limitando a capacidade de transmissão.

As diferenças de tempo entre os modos podem ser compensadas com a variação do índice de refração em função do raio do núcleo. Isso é possível por meio da fibra de índice gradual, que possui índice de refração variável com valor máximo no centro do núcleo, diminuindo à medida que se aproxima da casca. Dessa maneira, a velocidade de propagação será maior para os modos de percursos mais longos e menor para os modos de percursos mais curtos.

A figura 11.8 mostra a diferença de comportamento entre tipos de fibra com relação ao alargamento do impulso.



**Figura 11.8**

Efeito da dispersão modal em fibras multimodo de índice degrau e gradual.

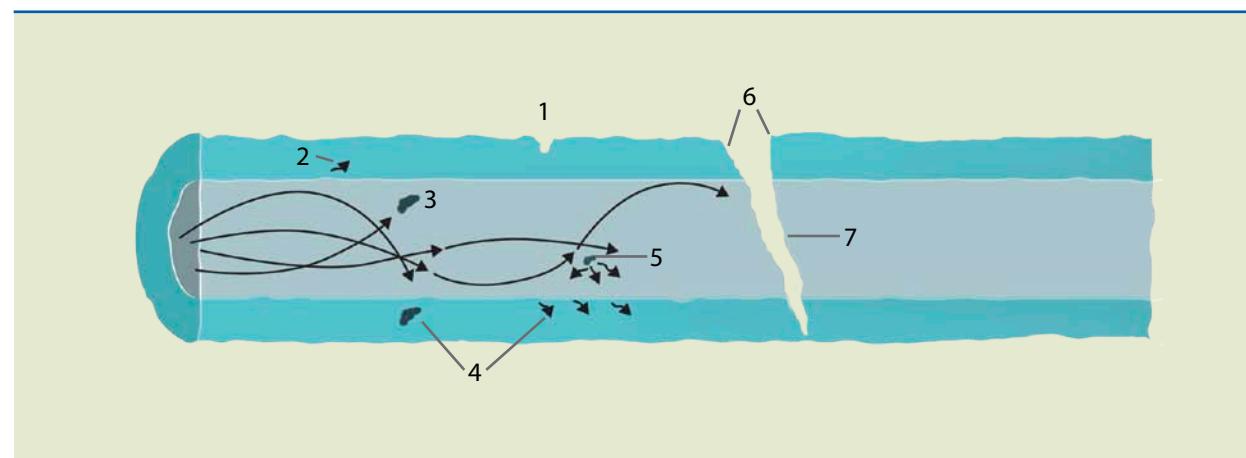
11.5 Atenuação

Ao se propagar em um condutor de fibra óptica, a luz sofre atenuação, ou seja, perde energia. Em um sistema de transmissão por fibra óptica, a análise de atenuação total introduzida é muito importante, pois determinará a quantidade de repetidores necessários para regeneração dos sinais transmitidos. Esses repetidores representam parcela substancial no custo total de um sistema; assim, o investimento final é basicamente controlado pela perda na fibra óptica.

A fibra apresenta perdas porque seu processo de fabricação introduz pequenas variações dimensionais, ocorrendo espalhamento da luz e, de modo geral, afetando a qualidade das emendas e conexões. A figura 11.9 mostra alguns fatores que influenciam a atenuação.

Figura 11.9

Fatores que influenciam o aumento de atenuação.



- (1) Trinca na superfície causará uma ruptura na fibra
- (2) Perdas por microcurvas causadas por deformações de superfície
- (3) Absorção por impureza ou íon OH
- (4) Irregularidades na deposição causam perdas por espalhamento
- (5) Perdas por espalhamento devido a pequenas flutuações de composição do material
- (6) Variações de diâmetro causam perda de conexão
- (7) Ovalização e excentricidade do núcleo causarão perda de emenda

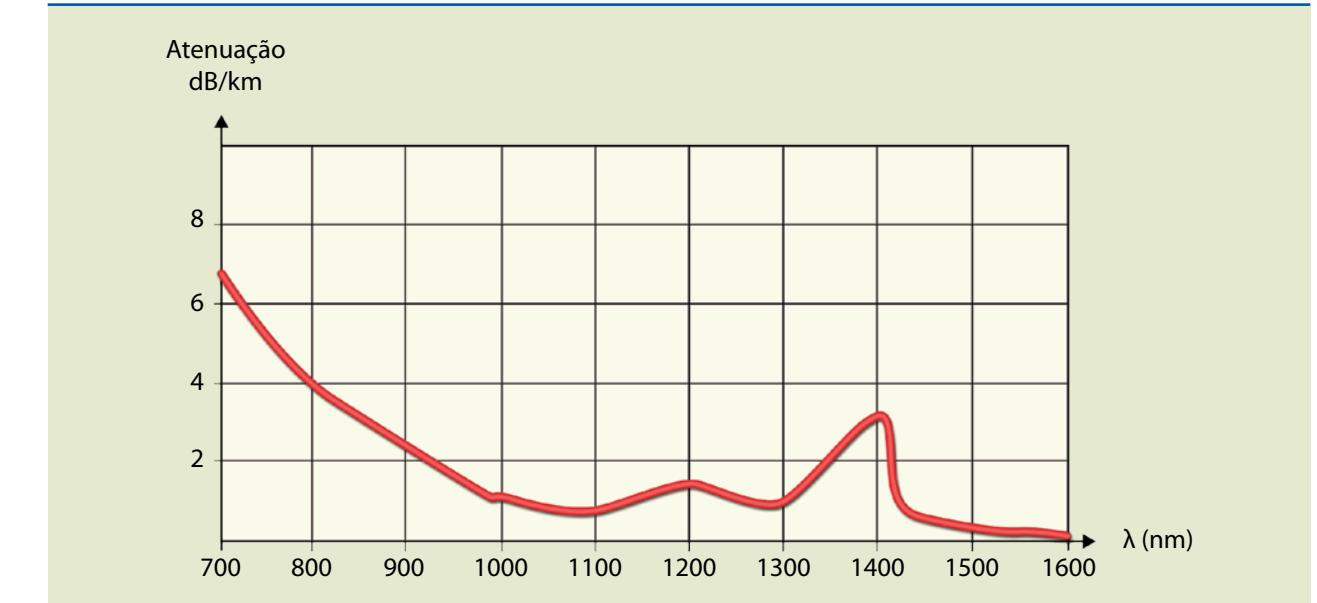
Portanto, a atenuação na fibra óptica compõe-se da somatória de várias perdas ligadas ao processo de fabricação, bem como do material empregado em sua fabricação. O comprimento máximo de um enlace óptico será determinado com base na somatória de todas as perdas envolvidas.

A atenuação varia em função do comprimento de onda da luz. As regiões de baixa perda e pequena atenuação dentro do espectro eletromagnético são chamadas janelas. A primeira geração de fibras ópticas opera na primeira janela, compreendida entre 820 nm e 850 nm. A segunda janela, com baixa atenuação, corresponde a 1 300 nm, e a terceira, a 1 550 nm.

Analizando a curva da variação da atenuação em função do comprimento de onda (figura 11.10), pode-se observar um ponto mínimo próximo à janela de 1 550 nm. Assim, considerando apenas a atenuação, é oportuno operar um sistema óptico em 1 550 nm.

Figura 11.10

Atenuação x comprimentos de onda.



11.6 Tipos de fibra óptica

As fibras ópticas costumam ser classificadas de acordo com suas características básicas de transmissão, ditadas essencialmente pelo perfil de índices de refração da fibra e por sua habilidade em propagar um ou vários modos. Essas caracterís-



ticas influenciam sobretudo a capacidade de transmissão e as facilidades operacionais em termos de conexões e acoplamentos.

Ao relacionar o índice de refração de um condutor de fibra óptica com o raio desse condutor, obtém-se o perfil do índice de refração. Esse perfil representa a variação radial do índice de refração do condutor de fibra óptica desde o eixo do núcleo até a periferia da casca:

$$n = n(r)$$

A propagação dos modos no condutor de fibra óptica depende da forma do perfil de índices de refração. Dessa maneira, quanto ao perfil do índice de refração, classificam-se as fibras ópticas em: fibras de índice degrau e fibras de índice gradual.

Outro fator importante nos condutores de fibra óptica refere-se à quantidade de modos guiados. Denomina-se fibra óptica multimodo (MM – *multimode fiber optic*) ao condutor com vários modos guiados em seu núcleo, e fibra óptica monomodo (SM – *single-mode fiber optic*), ao condutor em que se propaga apenas um modo (modo fundamental).

Segundo essa classificação básica, os tipos de fibra óptica são:

- Multimodo índice degrau (figura 11.11).
- Multimodo índice gradual (figura 11.12).
- Monomodo (figura 11.13).

Figura 11.11

Condutor de fibra óptica índice degrau.

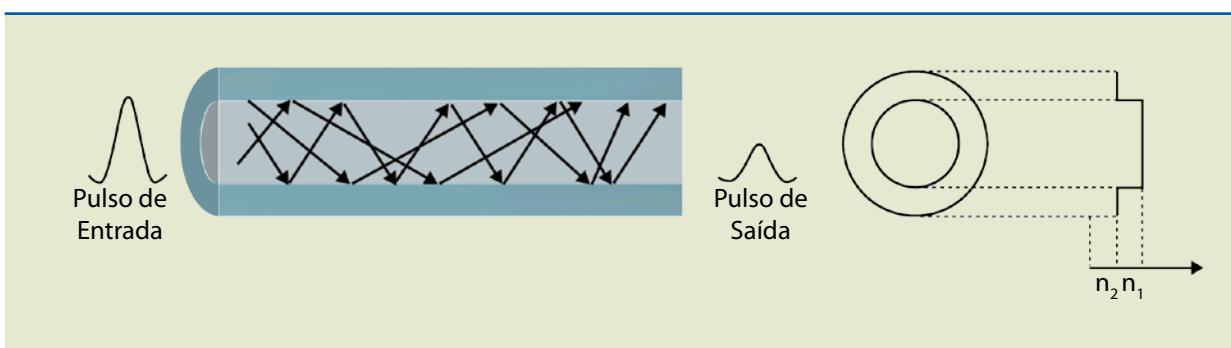


Figura 11.12

Condutor de fibra óptica índice gradual.

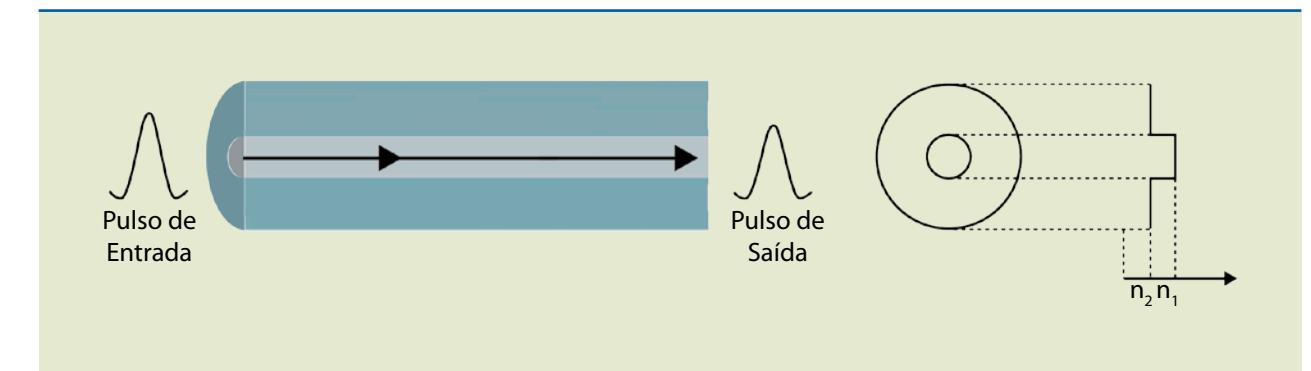
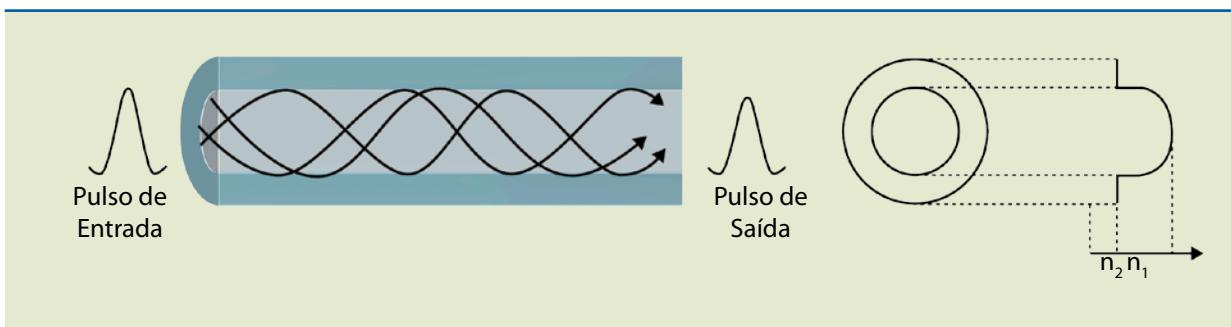


Figura 11.13

Condutor de fibra óptica monomodo.

É possível eliminar a alta dispersão da fibra multimodo índice degrau dimensionando o condutor de maneira a propagar um único modo. Para isso, é necessário reduzir o diâmetro do núcleo até um valor que permita somente a propagação dos raios axiais (modo fundamental), pois o diâmetro será poucas vezes maior que o comprimento de onda da luz utilizada.

Embora as fibras monomodo se caracterizem por possuírem núcleo com diâmetro tipicamente inferior a 10 μm, as dimensões da casca permanecem na mesma ordem de grandeza das fibras multimodo. Isso porque a casca tem de ser suficientemente espessa para acomodar todo o modo propagado, tornando-o desprezível na interface externa.

Esses tipos de fibra óptica são empregados em telecomunicações com atenuação típica de 0,47 dB/km no comprimento de onda 1,3 μm e 0,2 dB/km no comprimento de onda 1,55 μm, bem como largura de banda de até 100 GHz/km. São totalmente fabricados de sílica (núcleo e casca).

A banda passante de uma fibra óptica é função de sua dispersão, que, por sua vez, depende diretamente das características do perfil de índices do guia de onda. As fibras monomodo típicas (sílica e índice degrau) caracterizam-se por uma região de dispersão nula em torno de 1,3 μm.

Variando as dimensões e diferenças de índices ou usando um perfil de índices diferente do degrau, é possível deslocar as condições de dispersão nula de uma fibra monomodo para comprimentos de onda de maneira que as perdas de transmissão sejam menores – por exemplo, 1,55 μm. Esse tipo de fibra é conhecido como fibra monomodo com dispersão deslocada (DS – *dispersion-shifted*).

11.7 Fibras de última geração

A necessidade de aumentar a capacidade dos enlaces ópticos levou ao desenvolvimento das fibras DS, com dispersão deslocada para 1,55 μm (efeito dispersão). No entanto, mostrou-se necessário ampliar também o comprimento desses enlaces, proporcionando maior espaçamento entre repetidores. Para isso, seria preciso aumentar a potência do laser de transmissão (efeito atenuação). Entretanto, quando a densidade de potência (potência/área do núcleo) ultrapassa determinados valores, surgem efeitos não lineares, provocando queda de desempenho.

No intuito de minimizar esse problema, foi desenvolvida a **fibra com a área efetiva do núcleo expandida (LEAF – large effective core area)**. Enquanto o raio do núcleo da fibra DS comum é de 4,2 μm , o da fibra com núcleo mede entre 4,7 μm e 6,9 μm .

O equipamento multiplexador por divisão de comprimento de onda (WDM – *wavelength division multiplex*) transmite vários canais por uma única fibra, multiplicando a capacidade do enlace. Os enlaces empregam 1,55 μm (menor atenuação) e altas potências de transmissão (maior alcance). Todavia, se um laser do WDM transmite em um comprimento próximo ao de dispersão zero, os efeitos de degradação aumentam muito em função de um efeito denominado quatro ondas (FWM – *four wave modulation*). Nesse efeito, o batimento entre duas frequências distintas produz novos componentes, que podem interferir de modo destrutivo em outros canais. A maneira encontrada para evitar esse efeito destrutivo foi a criação da **fibra com dispersão não zero (NZ – non zero)**.

Para acomodar todos os canais do WDM, é necessário que a fibra tenha características de dispersão plana (DFF), não zero (NZ) e núcleo expandido (LEAF).

11.8 Cabos ópticos

Os cabos ópticos são estruturas de encapsulamento e empacotamento de fibras ópticas que protegem e facilitam seu manuseio. Têm de ser suficientemente resistentes, para que as fibras não se quebrem com as tensões de puxamento do cabo durante sua instalação, e rígidos, para evitar curvaturas excessivas nas fibras.

A estrutura dos cabos ópticos deve facilitar o manuseio e emendas na fibra. É importante, portanto, que eles tenham revestimentos facilmente removíveis em campo, de modo a facilitar a instalação e eventuais reparos. As estruturas e os procedimentos de instalação dependem da aplicação (cabos aéreos, subterrâneos, submarinos etc.).

O processo de cabeamento pode afetar as características de transmissão das fibras principalmente no que se refere a perdas por microcurvatura, dispersão modal, diâmetro efetivo do núcleo e abertura numérica.

O desempenho de um cabo óptico costuma diminuir ao longo do tempo por três razões principais:

- Atenuação crescente, por causa da presença de hidrogênio, que pode ser gerado pela corrosão metálica da estrutura do próprio cabo.
- Fadiga estática, fazendo com que uma fibra quebre após alguns anos da instalação do cabo.
- Envelhecimento térmico da estrutura do cabo, acarretando aumento da atenuação por microcurvatura.

A figura 11.14 mostra as estruturas básicas dos cabos ópticos.

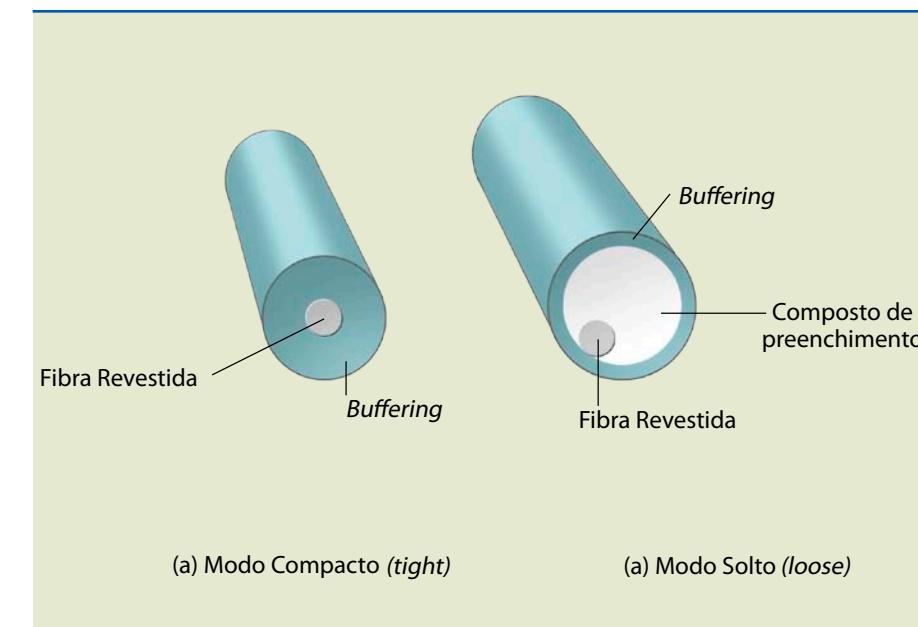


Figura 11.14
Estruturas básicas de cabos ópticos:
(a) modo compacto (*tight*)
e (b) modo solto (*loose*).

O empacotamento de várias fibras em um único cabo óptico pode ser realizado de diversas maneiras, segundo o tipo de aplicação. A figura 11.15a ilustra um cabo óptico com 12 fibras, baseado na estrutura elementar em modo solto. Os tubos contendo as fibras são acondicionados em volta de um elemento central cilíndrico (metálico ou não metálico), que funciona como estrutura de suporte físico ao cabo. Outro tipo de cabo óptico multifibra baseado no princípio do modo solto é apresentado na figura 11.15b. Nesse caso, o membro estrutural central cilíndrico é envolvido por um corpo de suporte na forma de estrela (de polietileno), com ranhuras em V, nas quais as fibras são colocadas.

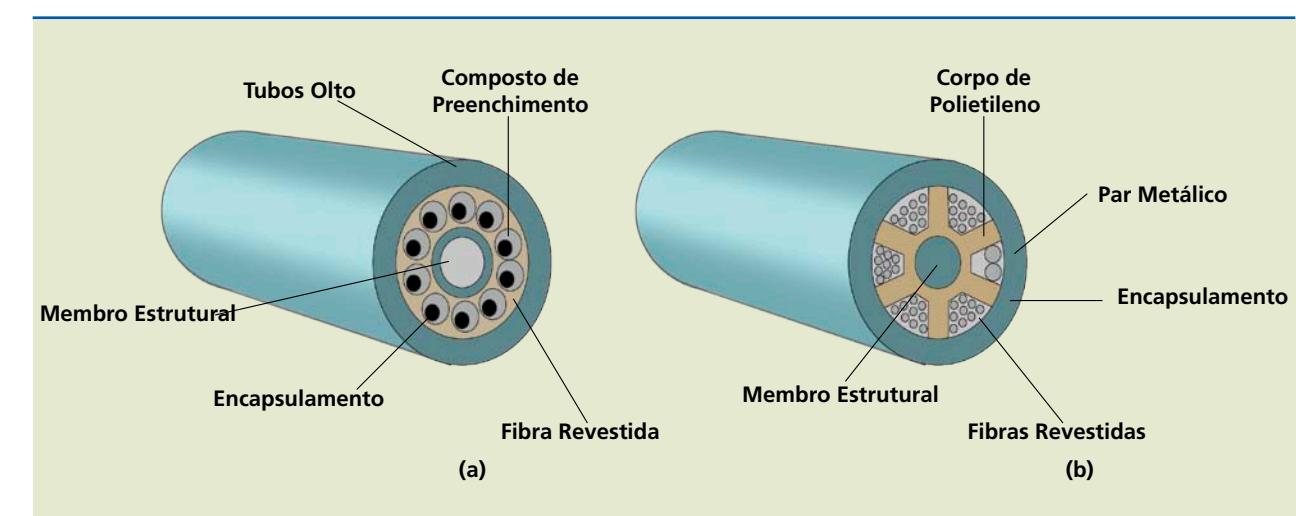


Figura 11.15
Cabos ópticos baseados em estruturas *loose*.

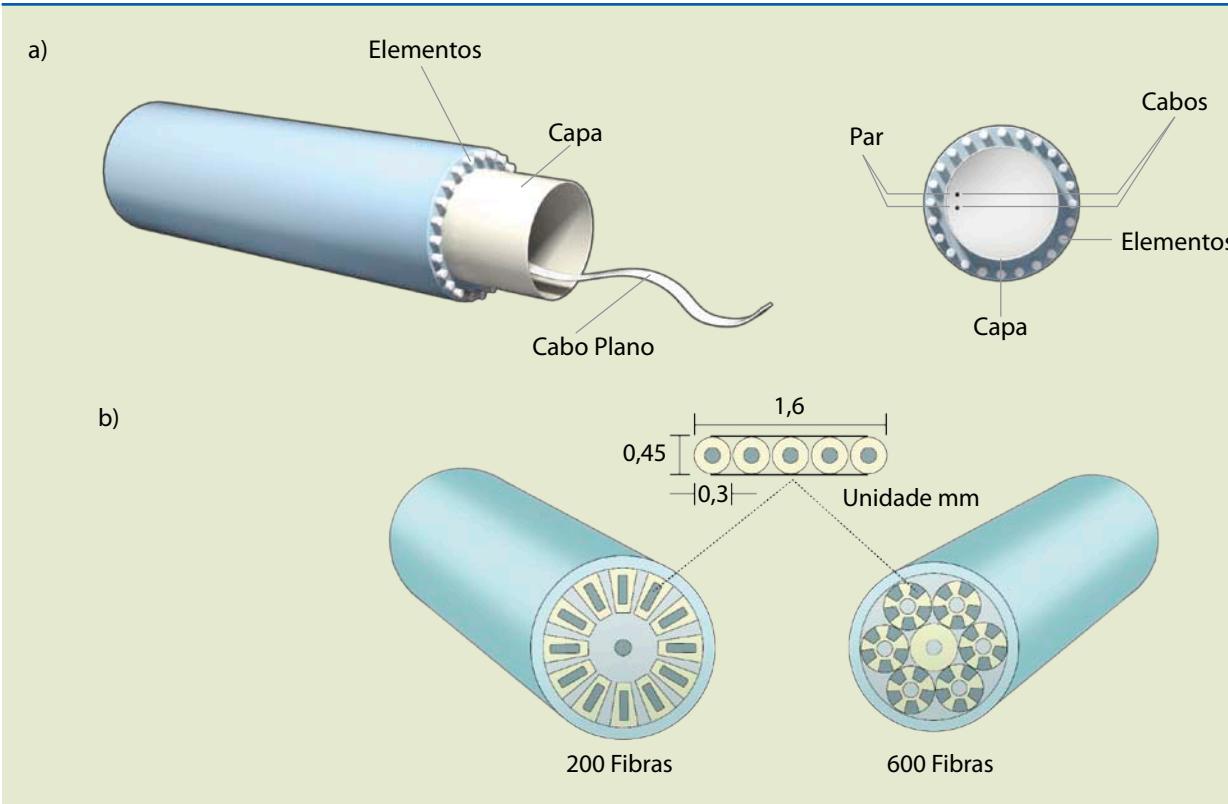
Observe que o cabo ilustrado na figura 11.15b contém um par de condutores metálicos para fins de energização remota de equipamentos.

Figura 11.16

Exemplos de cabos ópticos:

- (a) cabo com 12 fibras (BICC) e
- (b) cabos com 200 e 600 fibras.

Cabos ópticos com até 100 fibras podem ser confeccionados com estruturas circulares ou com estruturas elementares planas (figura 11.16a). Todavia, para cabos com mais de 100 fibras, as estruturas com cabos planos elementares tendem a ser mais adequadas (figura 11.16b). Esse tipo de estrutura possibilita obter, por exemplo, cabos com 1 000 fibras com diâmetro de 37 mm.



11.9 Isolador óptico

O isolador óptico permite a passagem da luz em apenas um sentido da fibra, absorvendo a luz que eventualmente retorna em função de reflexões ou espalhamento no caminho da transmissão. Esse dispositivo é muito utilizado em amplificadores ópticos para evitar pequenas reflexões de sinal nos conectores de entrada e saída. Tais reflexões poderiam provocar oscilações indesejáveis no espectro de emissão.

Os isoladores ópticos usados nos amplificadores à fibra dopada com érbio devem estar centrados no comprimento de onda de 1 550 nm e ter isolação mínima de 40 dB. Os dispositivos desse tipo empregados atualmente têm rejeição superior a 90 dB.

11.10 Redes fotônicas

Em redes ópticas de telecomunicações, a utilização de equipamentos regeneradores eletrônicos, além de aumentar o custo e a complexidade do sistema,

restringe sua largura de faixa. A flexibilidade alcançada com a implementação dos amplificadores ópticos vem do fato de que o sinal permanece no domínio óptico durante toda a extensão do enlace.

Existem dois tipos de amplificadores ópticos: amplificador a semicondutor e amplificador à fibra dopada com érbio (AFDE). Aqui será abordado apenas o último, já que o amplificador a semicondutor ainda não é difundido comercialmente.

Entre as principais características dos amplificadores ópticos estão a capacidade de operação em ambas as direções e a compatibilidade com sistemas (WDM), por amplificarem simultaneamente vários sinais de comprimentos de onda diferentes.

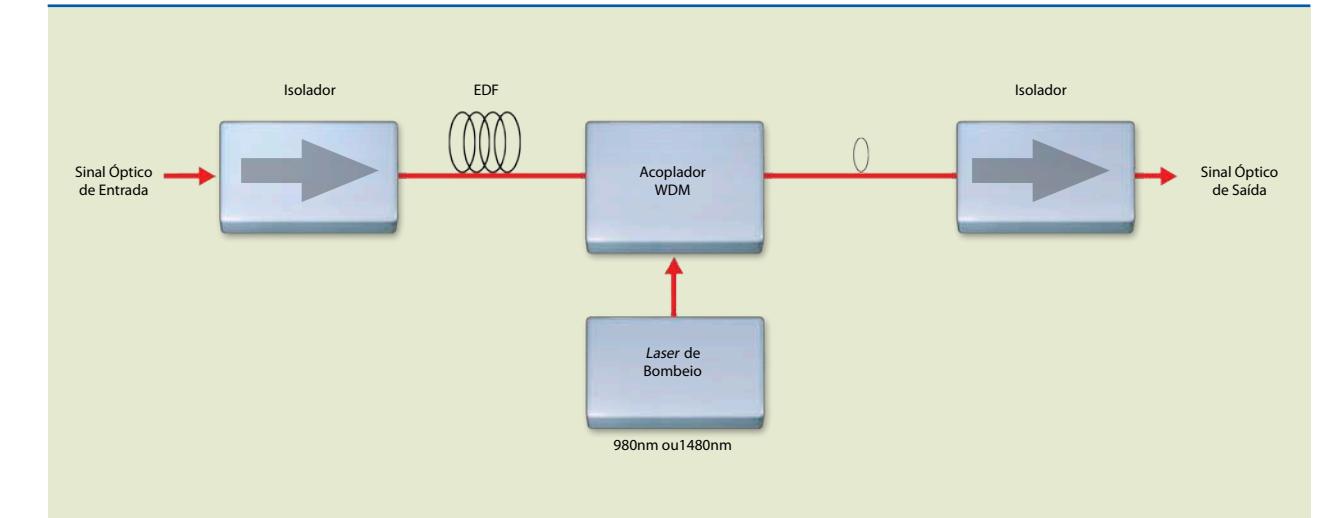
Os amplificadores ópticos são elementos vitais na implementação de redes ópticas de alta capacidade, como sistemas WDM, redes SDH, redes aéreas com cabos OPGW, redes ópticas de TV a cabo e enlaces de longa distância, terrestres ou submarinos.

O elemento amplificador de um AFDE é a fibra dopada a érbio. Basicamente trata-se de uma fibra de silício com diâmetro do núcleo em torno de 1,5 μm a 2,5 μm (quatro a seis vezes menor do que o diâmetro do núcleo de uma fibra convencional, que é de aproximadamente 9 μm), com alta concentração de íons de érbio (400 a 1 000 ppm, dependendo do fabricante).

De modo geral, para que ocorra amplificação, é necessário que o sinal a ser amplificado encontre no interior da fibra dopada íons excitados, dos quais extraírá a energia para gerar mais fôtons, que, por sua vez, serão novamente multiplicados, até que o sinal atravesse toda a fibra e saia amplificado.

O elemento responsável pela excitação dos íons de érbio é o *laser* de bombeio (*pump*), que geralmente emite luz no comprimento de onda de 980 nm (infravermelho), pois esse é o comprimento de onda em que o érbio absorve com melhor eficiência. *Lasers* em 1 480 nm também são disponíveis (figura 11.17).

Figura 11.17
Amplificador à fibra dopada com érbio.



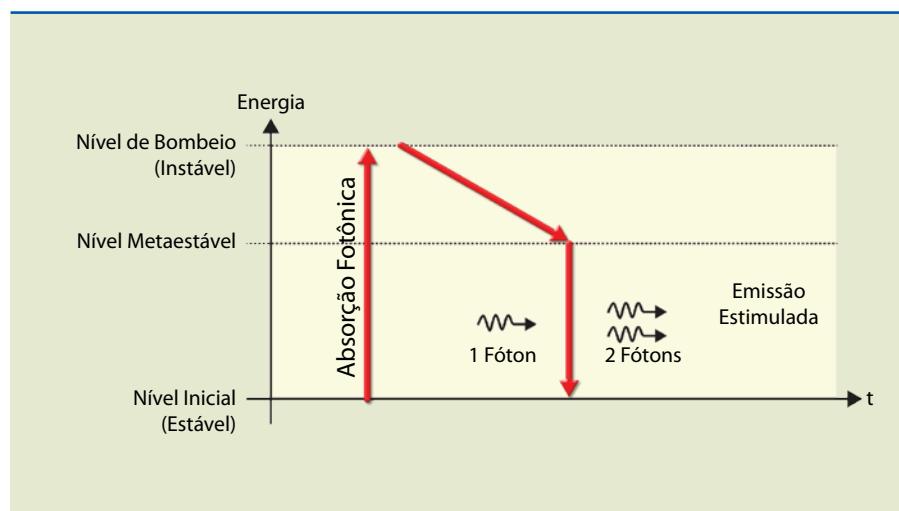
Quando um fóton provindo do *laser* de bombeio incide sobre um íon de érbio, seu estado energético inicial (estável) aumenta. Esse processo é conhecido por **absorção fotônica** e o nível energético alcançado pelo íon de érbio é chamado de **nível de bombeio** (instável). O íon de érbio permanece no nível de bombeio por curto tempo (menor que 1 ps), passando em seguida para um nível energético menor, denominado **metaestável**. Uma vez atingido o nível metaestável, poderão ocorrer dois fenômenos: decaimento espontâneo ou decaimento estimulado (emissão estimulada).

No **decaimento espontâneo**, há ou não emissão de fótons. Se há, os fótons têm frequência, fase, direção e sentido aleatórios. Durante seu percurso no interior da fibra de érbio, geram um efeito conhecido por **emissão espontânea amplificada** (ASE), que parte das duas extremidades da fibra de érbio. A ASE diminui sensivelmente a eficiência da potência de bombeio na excitação dos íons de érbio.

O **decaimento estimulado** ocorre devido à ação de um fóton incidente, oriundo do sinal a ser amplificado, sobre um íon de érbio excitado. A incidência do fóton sobre o íon excitado estimula a geração de mais um fóton de mesma energia, orientação e fase, o que resulta na amplificação do sinal (figura 11.18).

Figura 11.18

Diagrama de níveis energéticos do íon de érbio.



Os AFDEs podem ser instalados: na saída do transmissor óptico, constituindo-se como amplificador de potência; no meio do enlace, operando como repetidor; ou antes do receptor óptico, funcionando como pré-amplificadores (figura 11.19).

Para todas as possibilidades de configuração, é importante salientar a necessidade da utilização de transmissores ópticos com *laser* DFB. Essa necessidade se impõe para que o mecanismo de amplificação dos AFDEs se concentre em apenas uma raia espectral do *laser*. Nessas condições, aumenta a eficiência do ganho final e otimiza o comprimento final do enlace, que independe do número de amplificadores na linha, pois está vinculado à dispersão na fibra.

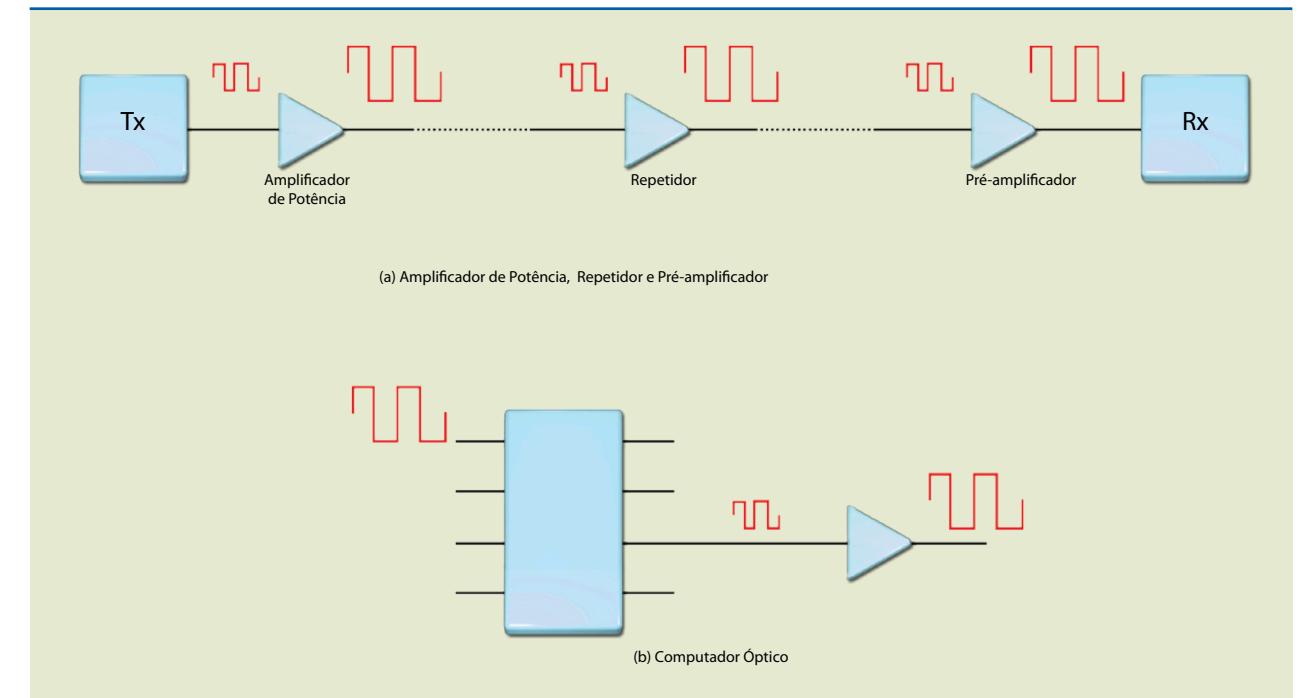


Figura 11.19

Aplicações típicas de amplificadores ópticos.

A tabela 11.2 mostra alguns tipos de amplificadores de acordo com a posição.

	Tipo de amplificador		
	Potência	Repetidor	Pré-amplificador
Localização	Após o transmissor	Local do regenerador	Antes do receptor
Utilização	Fonte/reforço	Amplificador de linha	Melhorar o receptor
Potência de saída	Alta	Alta	Baixa
Inserção de ruído	Alta	Baixa	Baixa
Ganho	Baixo	Alto	Alto

II.11 Multiplexação em comprimento de onda (WDM)

Tabela 11.2
Tipos de amplificadores de acordo com a posição.

A multiplexação por divisão de comprimento de onda envolve a transmissão de vários sinais com comprimentos de onda diferentes em paralelo em uma única fibra. Os primeiros sistemas comerciais surgiram em 1990, utilizando uma por-



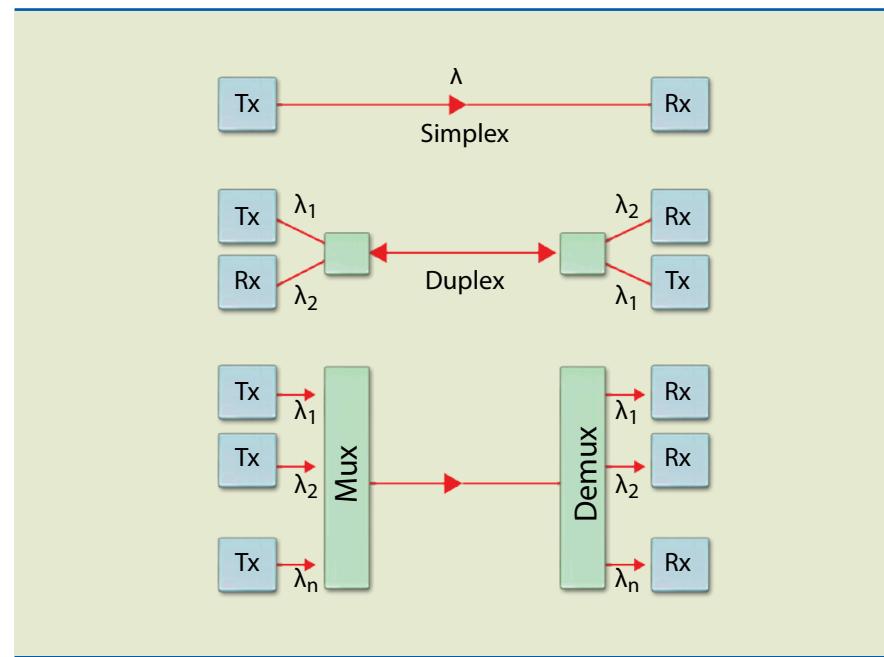
tadora em 1 300 nm e outra em 1 550 nm. Todavia, esses sistemas, com operação de quatro canais em uma única janela óptica (1 300 ou 1 550 nm) e arranjo de lasers em um único *chip*, foram plenamente introduzidos no mercado em 1995. Sistemas de 64 canais são comerciais e até uma centena de canais estarão disponíveis futuramente.

Apesar de a tecnologia WDM ser relativamente antiga, sua implementação se tornou viável graças ao desenvolvimento tecnológico nos processos de fabricação das fibras ópticas, bem como ao advento do amplificador à fibra dopada com érbio.

Embora em termos de espectro o WDM óptico seja similar à multiplexação por divisão em frequência, existem algumas diferenças entre ambos. A figura 11.20 ilustra um sistema óptico convencional em conjunto com um sistema duplex (ou seja, dois comprimentos de onda diferentes que viajam em direções opostas, permitindo a transmissão bidirecional) e um sistema multiplex (dois ou mais comprimentos de onda são transmitidos na mesma direção). É essa última configuração que vem atraindo considerável atenção, pois o esquema WDM permite a ampliação das capacidades dos sistemas já instalados.

Figura 11.20

Sistemas com um único comprimento de onda e com múltiplas portadoras.



A figura 11.21 mostra o diagrama em blocos simplificado de um equipamento WDM de 16 canais de 2,5 Gbps, formando um feixe composto de 40 Gbps. Como curiosidade, vale ressaltar que essa taxa de transmissão, em uma configuração ponto a ponto, seria capaz de transportar aproximadamente 500 mil canais telefônicos.

No exemplo da figura 11.21, no sentido da transmissão, o equipamento multiplexa 16 entradas ópticas de sinais STM-16 (2,5 Gbps) em um único sinal óptico de saída, que é transmitido por uma única fibra óptica. Essa transmissão se dá

por meio da alocação dos 16 canais com comprimentos de onda ao redor de 1 550 nm, ou seja, os 16 canais são multiplexados por divisão de comprimento de onda.

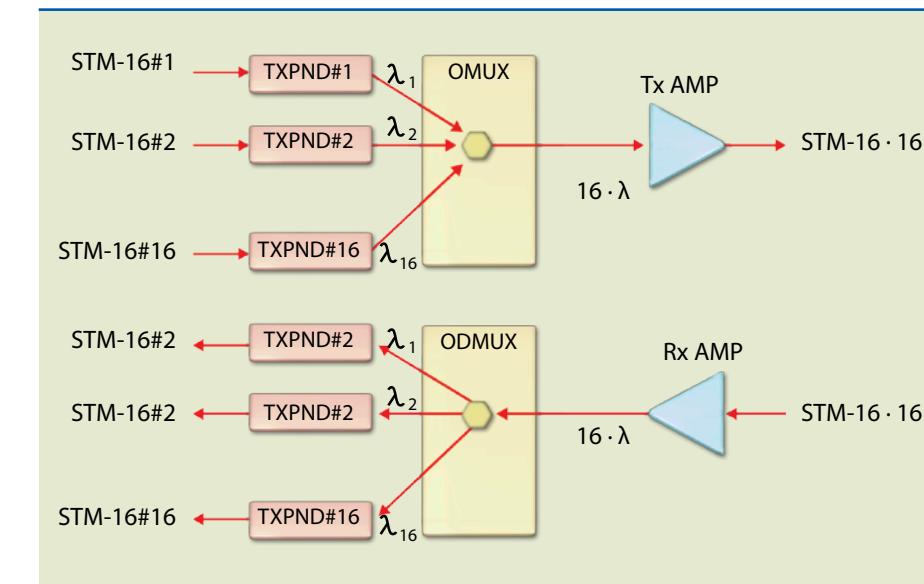


Figura 11.21

Diagrama em blocos de um WDM com 16 canais.

O equipamento representado possui função de deslocamento de comprimento de onda, executada por um dispositivo denominado *transponder*, o qual é independente do sinal óptico de entrada. Após o *transponder*, cada comprimento de onda pode ser distinguido com precisão no momento da multiplexação. Esses valores de comprimento de onda precisos são previamente padronizados e podem ser identificados na figura 11.22.

No sentido da receção, o equipamento demultiplexa os 16 sinais ópticos recebidos por meio de uma única fibra com seus diferentes valores de comprimento de onda; o *transponder* de recepção é opcional.

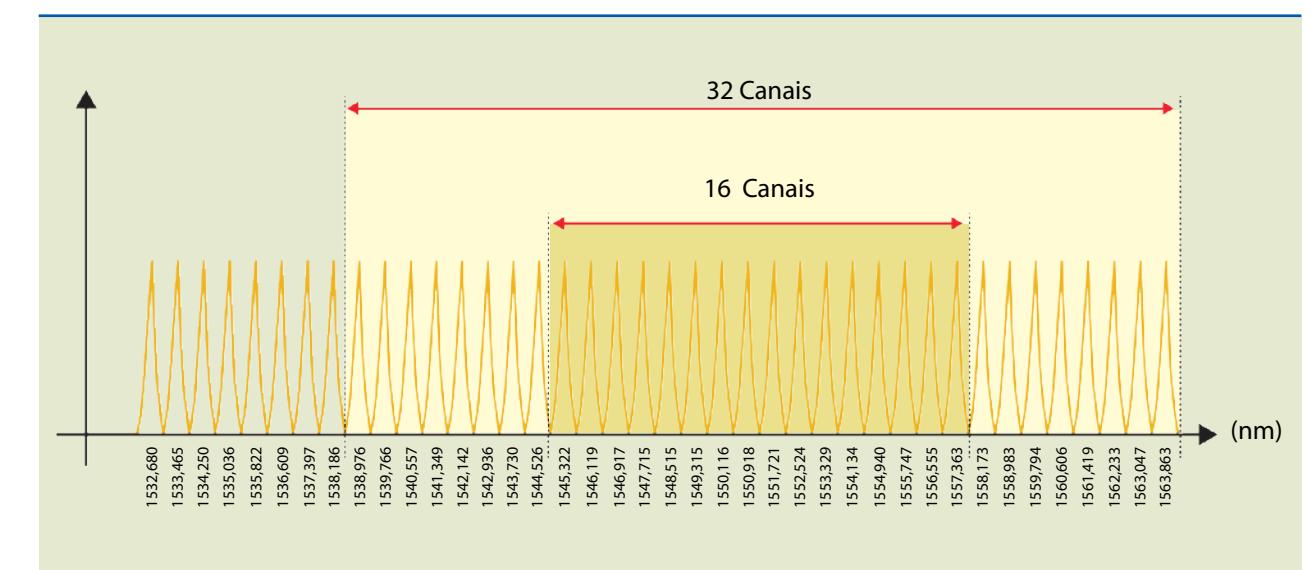


Figura 11.22

Comprimentos de onda em WDMs de 16 e 32 canais.

II.12 Anexos

Figura II.23

Índice de refração de grupo.

Anexo 1: Índice de refração de grupo

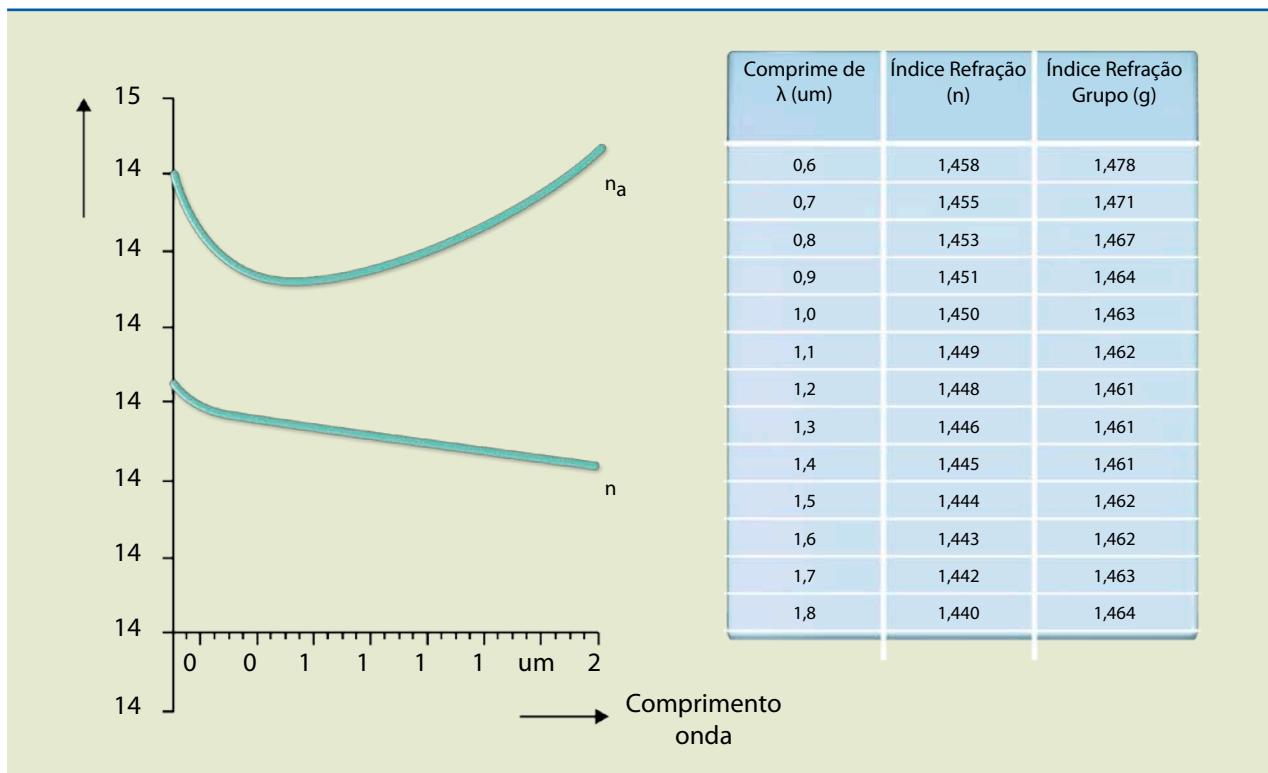
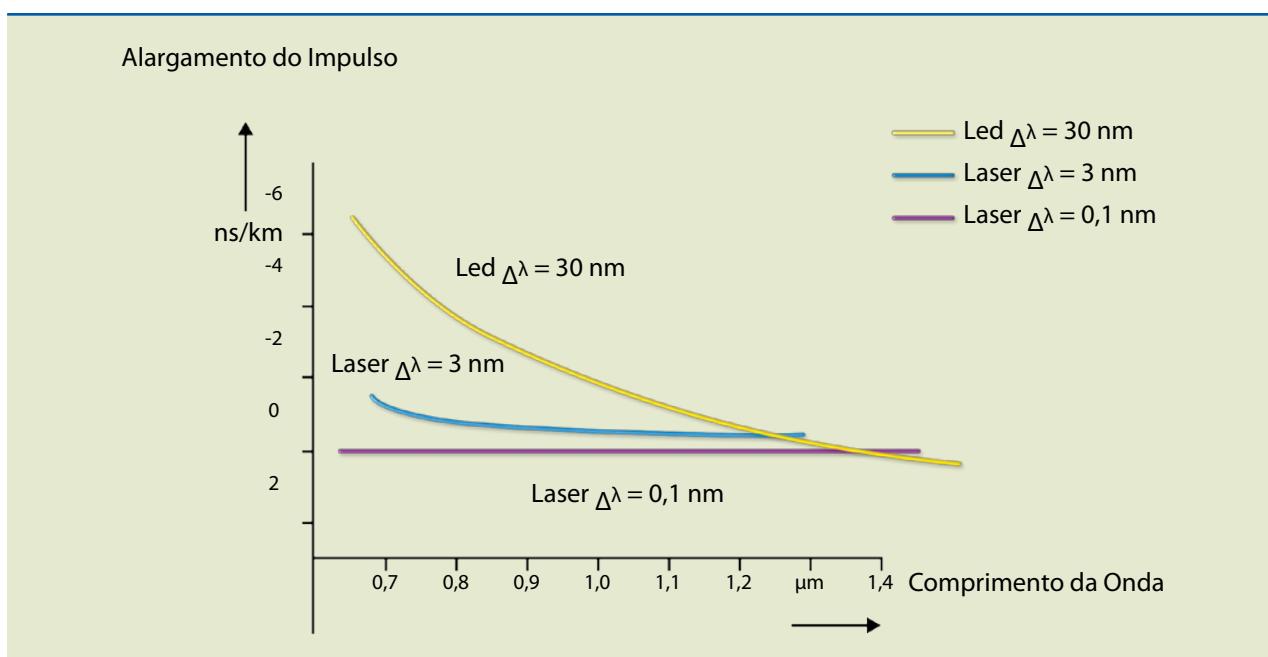


Figura II.24

Dispersão material ou cromática.

Anexo 2: Dispersão material ou cromática



Capítulo I2

Telefonia móvel celular





sistema de telefonia móvel surgiu para suprir a necessidade de comunicação durante o deslocamento do usuário. Telefonia ou comunicação móvel é aquela em que existe a possibilidade de movimento relativo entre os usuários ou as partes sistêmicas envolvidas, por exemplo: a comunicação entre aeronaves, entre aeronaves e uma base terrena, entre veículos; a telefonia celular; a computação móvel; algumas classes de sistemas de telemetria. No entanto, uma comunicação fixa (como um *link* de micro-ondas entre uma estação rádio base e uma central de comutação e controle de um sistema de telefonia celular) não caracteriza uma comunicação móvel. Vários exemplos dessa natureza podem ser encontrados na prática.

Em 1921, o Departamento de Polícia de Detroit, Estados Unidos, implantou um sistema móvel unidirecional de 2 MHz, utilizando modulação em amplitude (AM), com a finalidade de prover a transmissão de mensagens para suas viaturas. Esse sistema, precursor do serviço de radiobusca (*paging*), representa o marco inicial da telefonia móvel. Entretanto, a instabilidade dos receptores e a cobertura limitada foram alguns dos entraves para sua expansão.

O desenvolvimento de um novo receptor em 1928 propiciou a instalação de sistemas bidirecionais, ainda em AM, no início da década de 1930. Adicionalmente, a Federal Communication Commission (FCC) autorizou a utilização de quatro canais na faixa de 30 a 40 MHz. Todavia, com a utilização da modulação em amplitude, a qualidade do sinal recebido não era satisfatória. Esse problema foi resolvido somente em 1935, com a invenção da modulação em frequência (FM).

Por sua importância estratégica, os sistemas móveis tiveram considerável desenvolvimento durante a Segunda Guerra Mundial. Aplicações militares desenvolvidas pela Bell Labs e pela Western Electric foram responsáveis pelos avanços tecnológicos nesse campo no período industrial. Como resultado desse esforço, foi implantado nos Estados Unidos, em 1946, o primeiro serviço móvel de telefonia pública (manual – 150 MHz).

O primeiro sistema de comunicação móvel disponível com certo grau de praticidade foi o MTS (*mobile telephone service*), implantado em Saint Louis pela Bell Telephone Company em 1946. Ele era composto de um único ponto centralizado (chamado de estação base), ou seja, toda a região a ser coberta possuía uma única célula, com um transmissor de potência elevada e poucos canais de conversação.

Esse sistema criava uma série de limitações de ordem prática, pois cada usuário tinha determinado canal de radiofrequência fixo, que era compartilhado por outros assinantes (em uma configuração semelhante à das atuais linhas partilhadas), impossibilitando que um usuário utilizasse um canal enquanto o outro estivesse falando.

A solução para esse problema foi a divisão em pequenas células da área a ser coberta. Dessa maneira, cada área tinha sua estação base e canais de RF distintos em UHF, com todos os canais da rádio base disponíveis para o usuário.

Veja quando surgiram alguns sistemas importantes, em ordem cronológica:

- 1947 – Sistema móvel para autoestrada (35 MHz).
- 1956 – Serviço móvel em 450 MHz (manual).
- 1964 – Serviço automático (IMTS – *improved mobile telephone system*) em 150 MHz.
- 1969 – Serviço automático (IMTS) em 450 MHz.
- 1979 – Japão: sistema MCS (*mobile communication system*).
- 1980 – Países nórdicos: sistema NMT (*Nordiska Mobil Telefongrupper*).
- 1982 – Reino Unido: sistema TACS (*total access communications system*).
- 1985 – Alemanha: sistema C 450.

O sistema de rádio celular representa o que existe de mais avançado em sistemas de comunicação móvel e se tornou praticamente indispensável para todos os setores ligados à segurança pública, além de atender às necessidades de organizações comerciais, industriais, governamentais e da sociedade em geral.

A telefonia móvel foi introduzida no Brasil em 1972, por meio de um sistema IMTS de baixa capacidade, instalado em Brasília. Entretanto, o primeiro sistema de telefonia celular (AMPS) foi implantado somente em novembro de 1990, pela Telerj, no Rio de Janeiro. Um ano depois, surgiu o sistema da Telebrasília. Em 1992, o número de cidades atendidas subiu para cinco e, em 1993, para 17. Em dezembro de 1993, o total de usuários era 175 mil, atingindo cerca de 600 mil no final de 1994.

12.1 Estrutura celular

Células são áreas de serviço individuais, cada uma delas com um grupo de canais designados de acordo com o espectro disponível.

Quando se pensa em uma célula, a primeira ideia é a de uma estrutura circular, pois, em condições ideais de propagação e utilizando uma antena omnidirecional, a zona de cobertura é uniforme. Entretanto, quando se monta um aglomerado de células, o modelo de irradiação circular traz certos problemas, como áreas de superposição e de sombra.

As células normalmente são representadas por hexágonos, o que possibilita que sejam colocadas lado a lado, sem os inconvenientes citados. Esse recurso é sómente para uso em modelos teóricos; na prática, é impossível conseguir condi-

ções tão favoráveis de propagação, pois uma região coberta por um sinal RF está sujeita a vários fenômenos da natureza, gerando consideráveis problemas em seu recurso.

A tabela 12.1 mostra uma comparação entre um sistema centralizado e um sistema celular.

Tabela 12.1

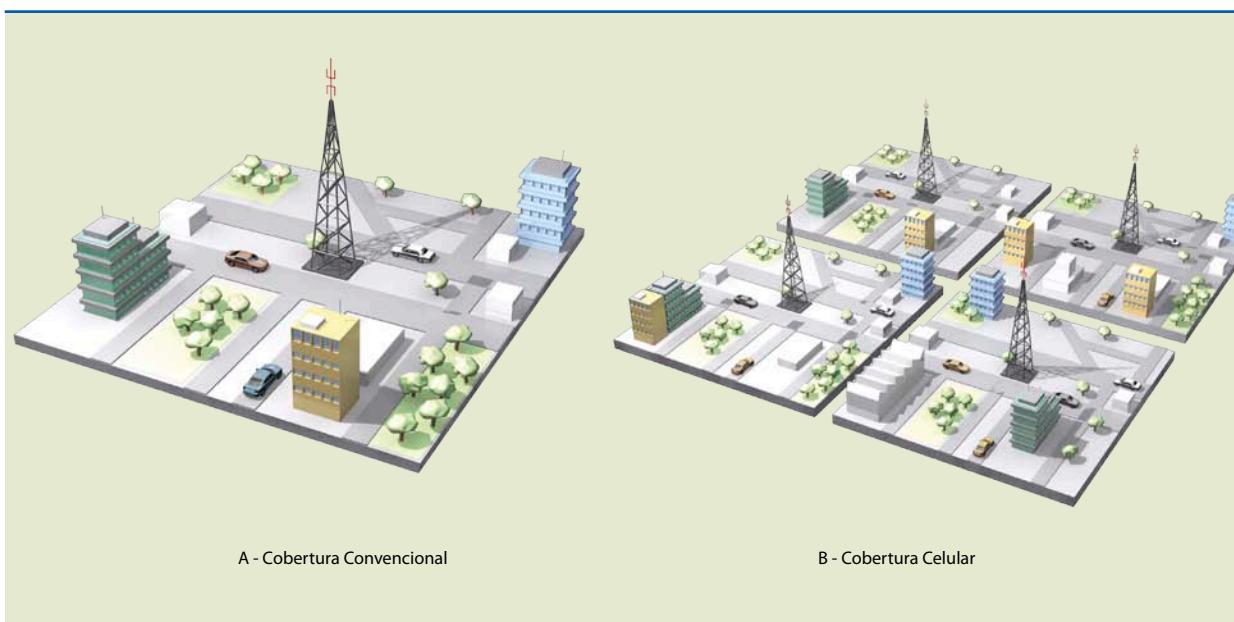
Diferenças entre sistemas móveis convencionais e sistemas celulares.

Sistemas móveis convencionais	Sistemas celulares
Baixa densidade de usuários	Alta densidade de usuários
Não reutilizam frequências	Reutilizam frequências
Alta potência de transmissão	Baixa potência de transmissão
Antenas elevadas	Antenas pouco elevadas
Grande área de cobertura	Área de cobertura dividida em células
Sem expansão modular	Expansão modular teoricamente ilimitada

Fonte: http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/collaboradores/boros/cdma_01.html

Figura 12.1

Conceitos de cobertura para comunicações móveis:
(a) cobertura convencional e (b) cobertura celular.



Como vimos, a célula é uma área geográfica coberta por sinais de RF por meio de um sistema de comunicação chamado **estação rádio base** (ERB). Ela pode ser considerada um centro de radiocomunicação, em que um assinante móvel pode estabelecer uma chamada para um telefone móvel ou fixo por meio da **central de comutação móvel** (MSC, ou CCC – central de comu-

tação e controle) e da rede de telefonia pública comutada (PSTN). Portanto, permite que usuários se comuniquem entre si em qualquer lugar da área de cobertura, seja essa comunicação entre usuários móveis, seja entre usuários móveis e fixos.

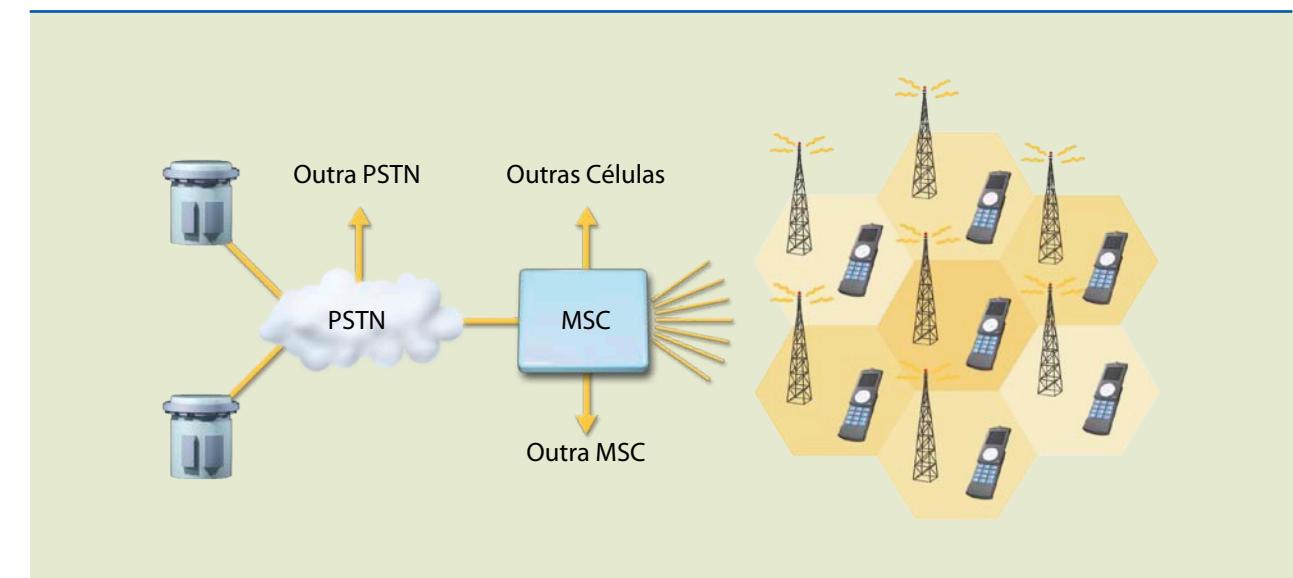
O sistema móvel celular é composto basicamente por três elementos principais:

- Estação rádio base.
- Estação móvel.
- Central de comutação móvel.

Pode-se considerar também a rede de telefonia pública comutada parte do sistema, devido a sua interligação com a rede de telefonia celular. A figura 12.2 esquematiza uma rede de comunicação celular e sua interligação à PSTN.

Figura 12.2

Rede celular e interligação à PSTN.



12.1.1 Estação rádio base (ERB)

As estações rádio base são responsáveis pela comunicação de rádio entre a estação móvel (aparelho celular) e a central de comutação e controle (CCC), efetuando a realização das chamadas recebidas ou destinadas aos móveis localizados em cada uma das células. As estações são conectadas à CCC por meio de ligações terrestres ou via rádio. Consistem em dois elementos básicos: o sistema de rádio e o sistema de controle.

São funções da ERB:

- Prover a interface de rádio entre as estações móveis e o sistema.
- Converter sinais de RF em áudio e vice-versa.
- Alertar os usuários sobre chamadas recebidas.
- Informar o sistema sobre tentativas de origem das chamadas.
- Responder a comandos recebidos da CCC.

O **sistema de rádio**, também conhecido como BTS (*base transceiver station*), incorpora todo o conjunto de transmissão e recepção, e antenas. O sistema de controle (BSC – *base station controller*) é responsável pelo controle, monitoração e supervisão das chamadas.

Handoff é o procedimento de troca de célula de um usuário móvel, durante uma conversação. Ocorre quando a estação móvel se distancia da ERB que controla sua chamada e o sistema percebe que o nível de sinal está abaixo de certo limiar, definido em projeto. Então, o sistema procura entre as células vizinhas qual está com melhor sinal e sinaliza ao celular para ocupar um dos canais livres dessa célula. Tal procedimento é automático e imperceptível para o assinante.

A estação base faz a alocação e realocação de canais aos móveis e monitora os níveis de sinal dos móveis para verificar a necessidade de **handoff**.

Os canais utilizados na comunicação entre estações móveis e ERB são divididos em dois grupos:

- Canais de voz.
- Canais de controle.

Nos canais de voz ocorre a conversação (ou troca de dados). Neles também pode também ser realizada alguma forma de sinalização para a manutenção da chamada, como sinalização de *handoff*.

Os canais de controle carregam as informações necessárias ao estabelecimento de uma chamada, bem como informações sobre o atual estado do sistema. Canais de voz podem ser analógicos ou digitais, dependendo do sistema, porém canais de controle são sempre digitais.

Cada canal de comunicação é composto por um par de frequências, constituindo um sistema *full-duplex*, dividido em canal direto e canal reverso. O canal direto é responsável pela comunicação no sentido ERB-estação móvel, e o reverso, pela comunicação no sentido oposto, sempre alocado nas frequências baixas do espectro disponível.

Existem, no mínimo, dois tipos de canais em cada enlace (direto e reverso). O enlace direto contém o canal de *paging* (transmissão de dados de controle e sinalização para as estações móveis em sua área de cobertura) e o canal de tráfego (transmissão de voz e dados). Já o enlace reverso possui o canal de acesso, utilizado pelas estações móveis para realizar pedidos de chamada, e outro canal de tráfego.

12.1.2 Estação móvel

A unidade móvel do assinante constitui a interface entre o assinante móvel e a ERB. Trata-se de um transceptor portátil de voz e dados que modula as informações para serem transmitidas à ERB e demodula as informações recebidas da ERB. A unidade móvel é capaz de comunicar-se com os rádios das ERBs em qualquer um dos canais alocados, operando em modo *full-duplex*.

A estação móvel também se comunica com a estação base por meio de suas funções de controle e sinalização. Alguns exemplos de mensagens de controle trocadas entre móvel e base são:

- Pedido do móvel para acessar um canal e efetuar uma chamada.
- Registro do móvel na área de serviço atual (outra MSC).

- Mensagem de alocação de canal para o móvel, oriunda da estação base.
- Mensagem de *handoff* oriunda da estação base, para que o móvel sintonize outro canal.

A partir de agora, consideraremos “canal” a dupla *link* direto e reverso (figura 12.3).

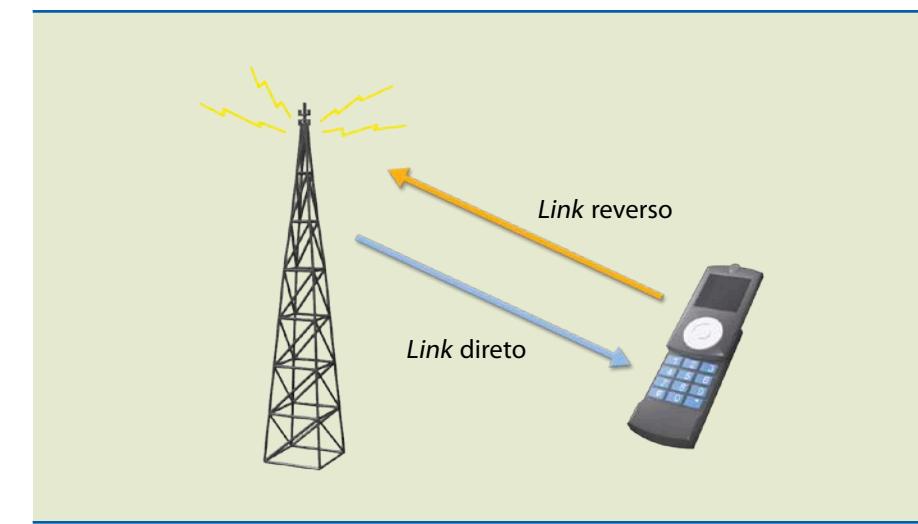


Figura 12.3
Comunicação entre terminal móvel e base.

A disponibilidade de recursos da estação móvel vem aumentando progressivamente, deixando de ser apenas um rádio e tornando-se cada vez mais uma central de recursos multimídia, com música, vídeos, jogos e TV digital.

12.1.3 Central de comutação móvel (MSC)

A MSC (*mobile services switching center*) é o elemento central do sistema de comutação celular, que interliga um conjunto de células. Também possibilita interligação com a rede de telefonia pública (PSTN) e com a rede digital de serviços integrados (RDSI).

São funções da MSC:

- Gerenciar e controlar os equipamentos da base de conexões.
- Dar suporte a múltiplas tecnologias de acesso.
- Prover a interligação com a PSTN.
- Prover registros de assinantes locais (HLR – *home location register*).
- Prover registros de assinantes visitantes (VLR – *visitor location register*).
- Dar suporte a conexões entre sistemas.
- Dar suporte de funções de processamento de chamadas.
- Controlar funções necessárias à tarifação.

A quantidade de células conectadas e controladas por uma MSC depende das necessidades. Uma MSC pode ser responsável por uma grande área metropolitana ou por um pequeno grupo de pequenas cidades vizinhas. A área servida por uma MSC é denominada área de serviço e o assinante de determinada área

Roaming é a utilização de uma estação móvel fora da área de serviço de seu sistema original. O uso dos serviços de outros sistemas é possível devido à conexão das MSCs pela RTPC e à criação de um registro do usuário móvel visitante no sistema hospedeiro.

de serviço é chamado **assinante local (home)**. O assinante que se desloca para uma área diferente daquela na qual está cadastrado é denominado **visitante (roamer)**.

12.2 Arquiteturas do sistema celular

A arquitetura do sistema celular pode ser centralizada ou descentralizada.

Na **arquitetura centralizada**, uma MSC controla grande quantidade de ERBs, próximas ou distantes dela. Normalmente é usada em sistemas pequenos, com baixa densidade de tráfego.

A **arquitetura descentralizada** utiliza MSCs atuando em uma região de abrangência menor ou controlando menos ERBs que a arquitetura centralizada. É adotada em sistemas maiores, podendo haver ou não interconexão entre as MSCs. Quando houver, a chamada de um móvel passará pela PSTN apenas se o usuário chamado for fixo. Quando não houver, mesmo que o usuário chamado seja móvel, mas pertencente a outra área de serviço (outra MSC, portanto), a chamada terá de passar pela PSTN, pois é ela que proverá o contato entre as duas MSCs.

12.3 Características do sistema celular

Mobilidade em telefonia celular é a garantia de que uma chamada, originada em qualquer ponto dentro da área de serviço, mantenha-se sem interrupção enquanto o assinante estiver em movimento. Isso é possível devido ao mecanismo de *handoff*, processo de troca de frequência das portadoras alocadas ao telefone quando o assinante muda da região de cobertura de uma ERB para outra.

A área de cobertura **ou abrangência** de uma célula depende de diversos fatores, como potência de transmissão, altura, ganho e localização da antena. Além disso, a presença de obstáculos (montanhas, túneis, vegetação e prédios) afeta de maneira considerável a cobertura RF de uma ERB.

Em razão das características de topografia das diversas regiões a serem cobertas por sistemas celulares, vários modelos de predição de propagação foram e têm sido desenvolvidos, com a intenção de fornecer estimativas de atenuação de sinal nos diversos ambientes.

Basicamente, existem três tipos de células, classificadas de acordo com seu diâmetro típico:

- Macrocelulas: de 2 a 30 km.
- Microcelulas: de 200 a 2000 m.
- Picocelulas: de 4 a 200 m.

O tamanho das células diminui com o crescimento do sistema celular. Esse decréscimo provoca:

- Aumento na capacidade de usuários e no número de *handoffs* por chamada.

- Menor consumo de potência do aparelho celular.
- Diversos ambientes de propagação.
- Maior interferência e dificuldade de planejamento do sistema.

Quanto à irradiação do sinal dentro da célula pela ERB, temos:

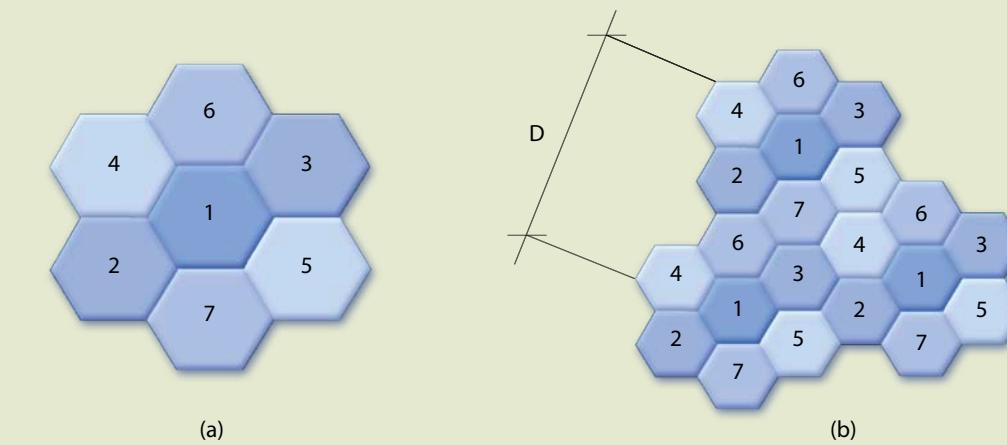
- **Células omnidirecionais** – ERB equipada com antenas que irradiam em todas as direções, formando uma área de cobertura circular.
- **Células setorizadas** – ERB equipada com antenas diretivas que irradiam em direções preestabelecidas, chamadas de setores. Cada setor é focado de acordo com um ângulo de 120°.

Cluster é o conjunto de células vizinhas que utilizam todo o espectro disponível. Ele pode conter todas as frequências do sistema celular, mas nenhuma frequência dentro dele pode ser reusada. A figura 12.4a apresenta um exemplo de cluster de sete células. Outras configurações muito utilizadas são de um, três, quatro e doze células.

À medida que o número de células por clusters aumenta, o número de canais por célula diminui e, portanto, também o tráfego, melhorando a qualidade do serviço.

Para cada ERB dentro de um cluster é alocado um grupo de canais de rádio, utilizados dentro da área de cobertura da célula. As ERBs de células adjacentes possuem grupos de canais diferentes das células vizinhas, evitando, assim, interferência. Limitando-se da área de cobertura até os limites da célula, um mesmo número de canais pode ser usado em outra célula. Para isso, as células devem estar separadas a uma distância tal que os níveis de interferência sejam aceitáveis, chamada de distância de reuso. Dessa maneira, usuários em diferentes áreas geográficas podem usar um mesmo canal simultaneamente (**reuso de frequências**, exemplificado na figura 12.4b), aumentando consideravelmente a eficiência da utilização do espectro. O processo de seleção e alocação de grupos de canais para todas as ERBs faz parte do planejamento de frequência.

Figura 12.4
(a) Cluster de sete células
e (b) reuso de frequências.



O cálculo da distância de reuso de frequências D depende do valor do raio da célula, no formato hexagonal, e do número de células do cluster, resultando na relação:

$$D = \sqrt{3}N \cdot r \quad (12.1)$$

em que:

- N é o número de células do cluster;
- r, o raio da célula.

No sistema móvel, há vários tipos de área:

- **Área de cobertura** – Área geográfica coberta por determinada estação rádio base (ERB). Qualquer estação móvel (EM) dentro da área de cobertura pode ser coberta pelo equipamento rádio daquela ERB. Define o tamanho da célula.
- **Área de controle** – Área atendida por uma central de comutação e controle (CCC) do serviço móvel celular (SMC). Uma área de controle pode conter diversas áreas de localização.
- **Área de localização** – Área na qual uma EM pode mover-se livremente sem ser necessária a atualização dos registros de localização. Uma área de localização pode conter diversas áreas de cobertura de ERB.
- **Área de registro** – Área de localização na qual a EM está registrada.
- **Área de serviço** – Área na qual as estações móveis compatíveis têm acesso ao SMC e um usuário de EM pode ser acessado por um usuário qualquer da rede fixa de telecomunicações, sem conhecimento prévio de sua exata localização. Uma área de serviço pode conter diversas áreas de controle.
- **Área de sombra** – Área na qual o sinal irradiado pela ERB sofre obstrução à propagação devido a sua topografia (morros, declives, vegetações etc.) ou obstáculos criados pelo ser humano (edifícios).

12.4 Técnicas de múltiplo acesso

Os sistemas celulares, analógicos ou digitais, têm a capacidade de processar várias chamadas simultâneas em uma mesma faixa de frequências. Essa capacidade é chamada de múltiplo acesso, que pode ser realizado de três maneiras:

- Múltiplo acesso por divisão de frequência (FDMA).
- Múltiplo acesso por divisão de tempo (TDMA).
- Múltiplo acesso por divisão de código (CDMA).

12.4.1 Tecnologia FDMA

A tecnologia de múltiplo acesso por divisão de frequência (FDMA – *frequency division multiple access*) é a mais antiga, utilizada nos sistemas analógicos, como o AMPS (*advanced mobile phone system*), primeiro padrão celular adotado no Brasil. No FDMA, a largura de banda disponível é dividida em canais ou frequências não sobrepostas, ou seja, durante toda a conversação a portadora está permanentemente alocada a um mesmo sinal de voz, sem ser compartilhada com sinais de outros usuários (figura 12.5).

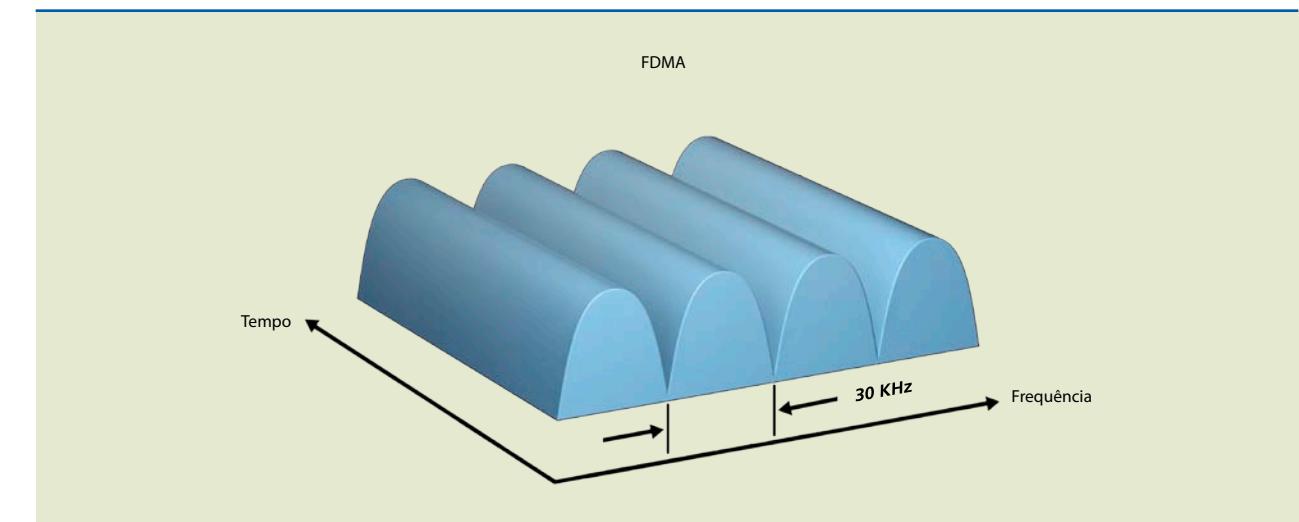


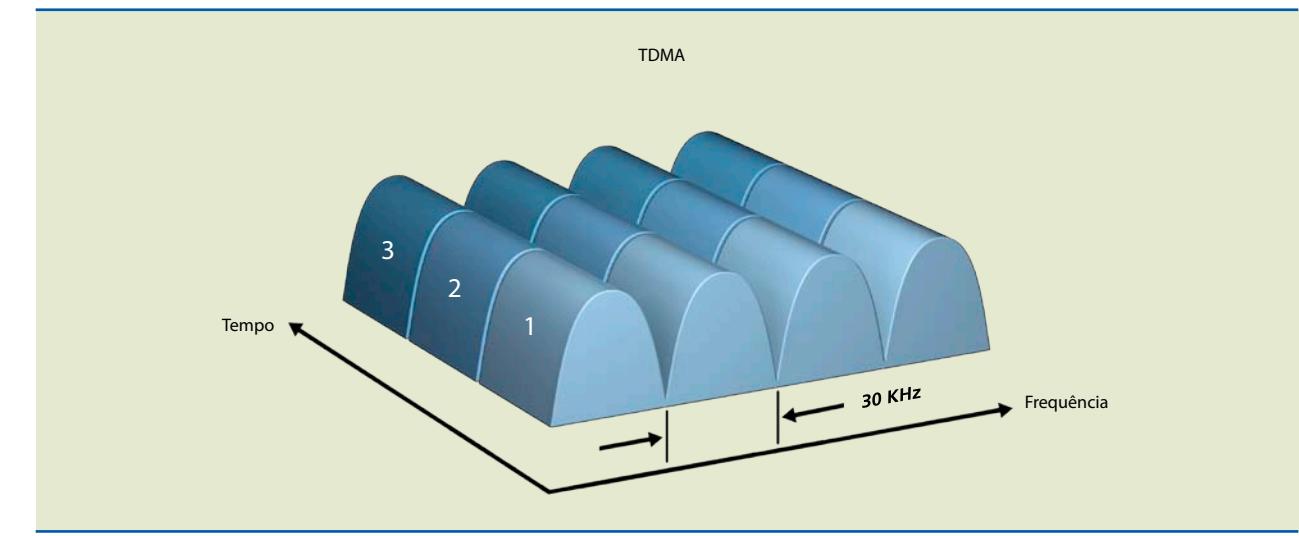
Figura 12.5
Tecnologia FDMA.

Cada sinal a ser enviado modula uma portadora distinta e todas as portadoras moduladas são agrupadas e transmitidas. Na recepção, o sinal de cada usuário é separado por um filtro passa-faixa sintonizado na portadora correspondente. Portanto, a interferência entre canais adjacentes é determinada pelo desempenho dos filtros utilizados e pela separação entre as portadoras.

12.4.2 Tecnologia TDMA

No TDMA (*time division multiple access*), várias conversações são transmitidas compartilhando um canal de RF, em intervalos de tempo distintos, ou seja, há um revezamento no tempo, na transmissão e na recepção dos sinais pelas estações móveis, sob a mesma frequência compartilhada. Cada usuário dispõe de uma faixa de frequências em determinado intervalo de tempo (*slot*), disponibilizado de maneira cíclica. Na transmissão TDMA, cada surto transmite uma palavra digital, composta de subconjuntos de bits de sinal de voz (codificação do sinal de voz), de sinalização telefônica, de alinhamento de palavras e quadros e de redundância para detecção e correção de erros (figura 12.6).

Figura 12.6
Tecnologia TDMA.



Utilizada em sistemas celulares digitais, essa tecnologia foi desenvolvida nos EUA e na Europa no início da década de 1990. Posteriormente, foi adotada, nos EUA, no sistema AMPS de segunda geração como D-AMPS (*digital AMPS*) utilizando o protocolo IS-54 (EIA/TIA) e, na Europa, como base do sistema GSM (*group special mobile*).

No Brasil, foi usado, primeiro, o padrão IS-136, com algumas características:

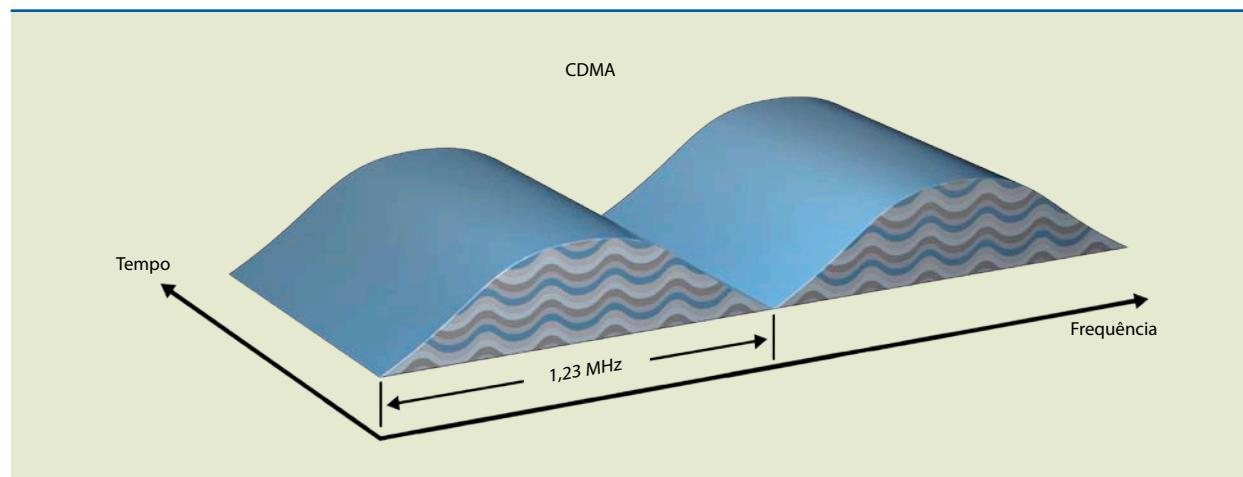
- BW (largura de banda) do canal: 30 kHz.
- Usuários por canal: três ou seis, a taxas de 7,95 kbps e 3,975 kbps.
- Faixas de frequências de operação: de 869 a 894 MHz para enlace direto e de 824 a 849 MHz para enlace reverso.
- Modulação: $\pi/4$ Shifted DQPSK.
- Número máximo de canais (tráfego e controle): 2 496.
- O IS-136 possui capacidade e desempenho seis vezes maiores que o analógico AMPS. O sistema GSM, que será estudado mais adiante, também utiliza o múltiplo acesso TDMA.

12.4.3 Tecnologia CDMA

O múltiplo acesso por divisão de código (CDMA – *code division multiple access*) utiliza **espalhamento espectral**. Essa técnica faz com que uma informação fique contida em uma largura de banda bem maior que o sinal, permitindo que todos os usuários utilizem a mesma faixa de frequências durante todo o intervalo de tempo. Assim, várias conversações são transmitidas simultaneamente no mesmo canal de RF em um mesmo intervalo de tempo. No entanto, cada conversação recebe um código de identificação, diferenciando-se das demais (figura 12.7).

Figura 12.7

Tecnologia CDMA.



Essa tecnologia foi idealizada na década de 1940 e por muito tempo teve uso militar. Sua aplicação comercial só ocorreu nos anos 1980.

Os canais de comunicação são separados por uma modulação pseudoaleatória, aplicada e removida no domínio digital, e não no domínio da frequência.

Múltiplos usuários podem utilizar a mesma banda de frequências (reuso de frequências), o que garante eficiência espectral, privacidade, por dificultar a interceptação do sinal, e grande resistência a sinais interferentes.

Algumas características importantes da utilização da tecnologia CDMA são:

- Capacidade de oito a dez vezes maior do que a do sistema AMPS.
- Melhoria na qualidade do sinal e maior privacidade.
- Melhoria nas características de cobertura, com menor número de células, reduzindo custos de operação e ampliação da rede.
- Redução das quedas de ligações devido ao *handoff*.
- Melhoria na capacidade de tráfego (*erlang*).
- Menor nível de interferências com outros equipamentos eletrônicos.
- Redução na potência de transmissão dos celulares.

12.5 Padrão IS-95

O sistema celular padrão IS-95 utiliza a técnica de múltiplo acesso CDMA, desenvolvido e utilizado nos EUA e também implantado em alguns países, principalmente da América Latina. No Brasil, a operadora Vivo emprega esse sistema.

Sua base é a técnica de espalhamento espectral (SS – *spread spectrum*), cujos tipos mais comuns são:

- Espalhamento espectral por sequência direta (DS/SS – *direct sequency/spread spectrum*).
- Salto em frequência (FH – *frequency hopping*).
- Na técnica FH, uma sequência pseudoaleatória alimenta um sintetizador de frequências que gera a portadora do sinal a ser transmitido, fazendo com que ela varie aleatoriamente dentro da banda de espalhamento.

O padrão IS-95 usa a técnica DS/SS, em que o sinal de informação é multiplicado por um sinal codificador com características pseudoaleatórias, conhecido como pseudoruído ou *pseudonoise (PN code)*. Com isso, todos os usuários do sistema são separados entre si por meio de códigos, podendo utilizar o mesmo canal físico simultaneamente. Em uma conversação, apenas o sinal desejado é decodificado e os sinais dos demais usuários parecerão ruído para o receptor. Na recepção, o sinal é novamente multiplicado pela função de espalhamento e decodificado. Essa técnica é chamada de *disspreading*.

Algumas características técnicas do IS-95 são:

- BW do canal: 1,25 MHz.
- Número de usuários por canal: depende da relação sinal/ruído adotada no sistema.
- Faixas de frequências: de 869 a 894 MHz no enlace direto e de 824 a 849 MHz no enlace reverso.
- Modulação QPSK.

12.6 Sistema GSM

O sistema GSM (*global system for mobile communications*) é o padrão mais utilizado hoje no mundo e foi desenvolvido na Europa no final da década de 1980 para solucionar a falta de padronização de sistemas celulares, analógicos, limitando os serviços prestados. No Brasil, foi implantado em 2002, substituindo as redes celulares digitais que usavam o padrão IS-136 (TDMA). Uma característica importante no GSM é que as informações do usuário necessárias à conexão na rede ficam armazenadas em um cartão (cartão SIM), garantindo maior segurança.

A tecnologia GSM possui padrões definidos de acordo com sua faixa de operação:

- **P-GSM (primary-GSM)** – É o sistema original, com frequências na faixa de 900 MHz (de 890 a 915 MHz para enlace reverso e de 935 a 960 MHz para enlace direto).
- **E-GSM (extended-GSM)** – Desenvolvido para aumentar a capacidade do P-GSM, opera também na faixa de 900 MHz. Esse padrão possui 35 MHz de banda em cada enlace.
- **R-GSM (railways-GSM)** – Evolução dos padrões anteriores, com maior capacidade de canais, opera na faixa de 900 MHz.
- **DCS 1800** – Operando na faixa de 1,8 GHz, foi criado para permitir a formação de redes de comunicação pessoal (PCN). Possui largura de banda de 75 MHz por enlace, aumentando significativamente a capacidade do sistema em número de usuários.
- **PCS 1900** – Opera na faixa de 1,9 GHz e oferece maior gama de serviços aos usuários do sistema.

A cada padrão desenvolvido, novos serviços foram implantados, como envio de SMS (*short message service*), aplicações multimídia e serviço de dados.

12.6.1 Canais do GSM

O sistema GSM utiliza uma combinação dos sistemas TDMA e FDMA, ou seja, dos sistemas que envolvem divisão de tempo e divisão de frequência. Conforme dito anteriormente, em um sistema FDMA, uma frequência é associada a um usuário. Assim, quanto mais usuários estiverem na rede, maior será a necessidade de frequência disponível. Combinando com o sistema TDMA, o GSM permite que vários usuários dividam o canal.

As frequências disponíveis são divididas em duas bandas: o enlace reverso (*uplink*), usado para transmissão da unidade móvel, e o enlace direto (ou *down-link*), utilizado para transmissão da ERB.

Cada banda (*uplink* e *downlink*) é dividida em canais (ou *slots*) com BW de 200 kHz, denominados ARFCN (*absolute radio frequency channel number*, ou número absoluto de canal de radiofrequência). Em cada canal associado a uma portadora, é feita também uma divisão no tempo para sua ocupação. Cada canal é compartilhado por até oito estações móveis, uma por vez. Ou seja, cada

estação móvel utiliza um *time slot* (ou pedaço de tempo) e depois aguarda sua vez de usar novamente.

Há dois tipos de canais no sistema GSM, usados para troca de informações de gerenciamento e manutenção da rede: canais de tráfego e canais de controle.

Canais de tráfego

O canal de tráfego (TCH – *traffic channel*) é utilizado para transportar voz e dados. É dividido em 26 espaços denominados *frames* (quadros), que representam um tempo de 120 ms. Ou seja, é como se fosse a comunicação direta entre a estação móvel e a estação rádio base, mas subdividida em 26 intervalos de tempo, que são aplicados da seguinte maneira:

- 24 *frames* para a comunicação de voz.
- Um *frame* para enviar informações de controle à unidade móvel, como alterar a potência de transmissão da estação móvel.
- Um *frame* não utilizado, ficando livre para ser usado em outras funções, como medir a potência de sinal das células vizinhas.

Desse modo, a cada 120 ms de conversação transportada pelo canal de tráfego, as informações de voz são transmitidas por 12 *frames*, interrompidas por um *frame* para transmissão de sinais de controle, mais 12 *frames* de conversação, um *frame* não utilizado, e assim por diante. Como cada *frame* corresponde a 1/26 de 120 ms (aproximadamente 4,6 ms), é como se a comunicação fosse estabelecida por 55,2 ms ($12 \cdot 4,6$), parasse por 4,6 ms, continuasse por mais 55,2 ms, parasse por 4,6 ms, e assim por diante. Como a interrupção é pequena, torna-se imperceptível ao usuário. Os usuários GSM compartilham o tempo e a frequência durante todo o período de utilização do sistema.

A formação dos dados que estão sendo transmitidos na rede GSM está contida no **superquadro**. Vamos entender como ele é montado.

Primeiramente, é formado um *time slot*, que, como vimos, é um intervalo de tempo. Ele equivale a um período de 156,25 bits; o período de cada bit é aproximadamente 3,69 µs, formando um *time slot* de 576,92 µs. Assim, cada assinante tem esse tempo para transmitir dados, espera sete outros usuários transmitirem e tem sua vez novamente.

O conjunto de oito *time slots* constitui um quadro, que tem duração de 4,6 ms. Vinte e seis quadros formam um multiquadro, com duração de 120 ms. Um conjunto de multiquadros compõe um superquadro, que é o quadro final contendo todas as informações.

Canais de controle

Além do canal de tráfego, é necessário existir um caminho entre a estação móvel e o restante do sistema para a troca de mensagens e sinalização. Esse tipo de informação circula por meio de canais de controle.

Os canais de controle são divididos em:

- Canais de *broadcast*.
- Canais de controle comum.
- Canais de controle dedicado.
- Canais de controle associado.

Os **canais de broadcast (BCH – broadcast channels)** são utilizados pela ERB para fornecer à EM informações de sincronismo com a rede. Há três tipos de canais de *broadcast*:

- **Canal de controle de broadcast (BCCH)** – Usado para transmissão de informações, como a identificação da ERB, alocações de frequências e outras informações e parâmetros para a EM identificar e acessar a rede.
- **Canal de sincronismo (SHC)** – Utilizado pela EM para ajustar seu *timing* interno e sincronizar a sequência do multiquadro.
- **Canal de correção de frequência (FCH)** – Empregado para transmitir as informações da referência de frequência que a EM deverá utilizar quando for ligada pela primeira vez.

Os **canais de controle comum (CCCH – common control channels)** ajudam a estabelecer as chamadas da EM para a rede. Há três tipos de canais de controle:

- **Canal de paging (PCH)** – Utilizado para alertar a EM sobre uma chamada que está sendo encaminhada a ela.
- **Canal de acesso aleatório (RACH)** – Usado pela EM para requisitar acesso à rede.
- **Canal de concessão de acesso (AGCH)** – Empregado pela ERB para informar à EM qual canal deverá ser utilizado. É o canal de resposta do canal RACH.

Os **canais de controle dedicado (DCCH – dedicated control channels)** são utilizados para troca de mensagens entre várias EMs ou entre uma EM e a rede. Há dois tipos de canais de controle dedicado:

- **Canal de controle dedicado independente (SDCCH)** – Usado para trocar sinalização tanto no *downlink* como no *uplink*.
- **Canal lento de controle associado (SACCH)** – Empregado para manutenção e controle do canal.

Quando as informações enviadas pelo SACCH indicarem que há outra célula com melhor qualidade de sinal, será necessário executar um *handover* (procedimento de mudança de célula). Como o canal SACCH não tem a largura de banda requerida para transmitir todas as informações necessárias ao *handover*, o canal de tráfego (TCH) será substituído por um intervalo de tempo pelo **canal rápido de controle associado (FACCH – fast associated control channel)**, para que ele forneça as informações necessárias à EM. Normalmente, quando o FACCH toma o TCH, há perda de alguns dados da conversação. Muitas vezes, acontece pequena interrupção na conversação quando ocorre um *handover*.

12.7 Transmissão de informações no sistema GSM

Na conversação por telefonia móvel entre dois usuários, duas etapas garantem a transmissão, a qualidade e a segurança da informação:

a) **Digitalização da voz** – É feita por um codec, equipamento que transforma o sinal analógico da voz em um sinal digital. A codificação deve garantir boa qualidade de voz, reduzir sinais redundantes e não empregar um algoritmo muito complexo para conversão dos sinais, evitando demora na codificação, que pode prejudicar a comunicação e aumentar o custo do sistema.

b) **Codificação do canal** – São adicionados alguns bits de controle na informação original para detectar e corrigir possíveis erros durante a transmissão. A codificação do canal é realizada nas seguintes fases:

- **Interleaving** – Um grupo de bits é reorganizado de outra maneira para melhorar o desempenho do mecanismo de correção de erros.
- **Montagem do burst** – O conjunto de *bits* convertidos pelo codec e rearranjados é separado em **bursts** ou trens de pulsos que serão transmitidos.
- **Dados de segurança** – Nessa fase, é adicionada uma chave secreta que protege os dados do usuário. Um programa gera um número combinando um algoritmo de segurança armazenado no cartão SIM e um número fornecido pela rede.

Burst é uma sequência de sinais a serem transmitidos.

A figura 12.8 dá uma ideia de como acontece a transmissão de sinais no sistema GSM.

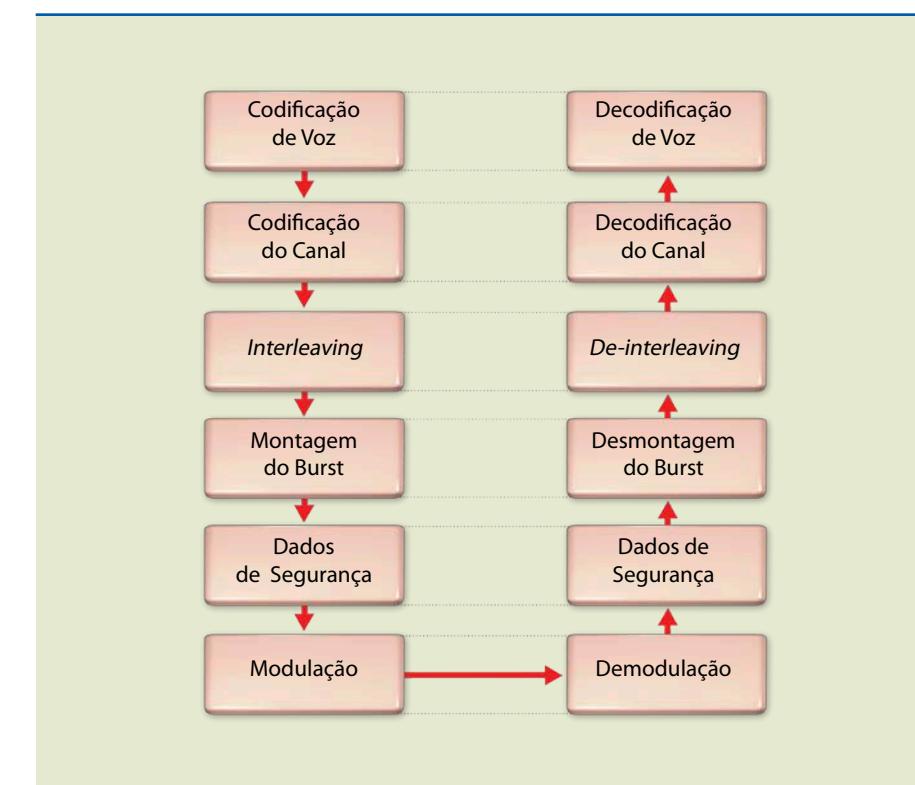


Figura 12.8
Aspectos de transmissão no sistema GSM.



12.7.1 Transmissão descontínua

A transmissão descontínua (DTX) do GSM interrompe a transmissão durante longos períodos de silêncio enquanto o usuário está ouvindo, mas não está falando. É uma função muito interessante, pois, além de aumentar a capacidade do sistema, permite que o aparelho celular economize bateria. A transmissão descontínua acontece graças a dois recursos:

- **Detector de atividade de voz (VAD – voice activity detector)** – É o que determina a presença da voz durante a conversação. O som que não tiver nível suficiente será considerado ruído e a transmissão, cortada.
- **Gerador de ruído de conforto (CNG – comfort noise generator)** – Para evitar o silêncio da descontinuidade da transmissão durante uma conversação, é inserido um ruído de fundo para que o usuário não tenha a impressão de que a chamada foi desconectada.

12.7.2 Recepção descontínua

Na recepção descontínua (DRX), as estações móveis são divididas em grupos de *paging* (processo de busca de uma EM para encaminhar a chamada). Como os grupos de *paging* são procurados ou chamados apenas em momentos predefinidos, nos outros momentos a EM fica em *sleep mode* (dormindo), conservando a energia da bateria, e volta a atuar quando recebe o *paging*.

12.7.3 Criptografia

Um dos principais recursos do GSM é a segurança. A ERB verifica se a cifragem está ativada ou desativada, e a criptografia dos dados acontece depois de eles terem sido intercalados e arranjados. Outro fator de segurança é a troca dos algoritmos de criptografia a cada chamada: mesmo que um desses algoritmos seja violado, a criptografia utilizada na próxima chamada será diferente.

12.7.4 Timing variável e controle de potência

Dentro da área de cobertura de uma célula, as EMs estão a diferentes distâncias da ERB. Dependendo dessa distância, ocorre atraso na comunicação com a ERB e atenuação da potência recebida pela EM.

Como o sistema GSM utiliza compartilhamento no tempo, a questão do atraso é muito importante. Para evitar a “colisão” de dados ou superposição (ou seja, dados chegando juntos), a ERB realiza medidas desses atrasos em cada EM. As EMs que estão enviando dados com atraso (devido à distância) recebem um comando para adiantar o envio. Dessa forma, garante-se que cada EM transmita em seu *time slot* correspondente, sem superposição nem atraso.

12.8 Modulação do sistema GSM

A modulação escolhida pelo sistema GSM é a técnica do chaveamento por deslocamento mínimo gaussiano (GMSK). Seu desenvolvimento está basea-

do na modulação FSK (*frequency shift keying*) com índice de modulação (m) igual a 0,5, sendo, assim, denominada MSK (*minimum shift keying*). Uma sequência de bits de entrada do modulador é filtrada por um filtro passa-baixa com resposta gaussiana a um pulso retangular. A saída desse filtro é responsável por modular em MSK as portadoras utilizadas. O efeito do filtro é conformar os pulsos de entrada do modulador MSK, tornando as transições de frequência mais suaves e, com isso, reduzindo a largura de faixa do lóbulo principal do sinal modulado.

Um parâmetro que caracteriza a modulação GMSK é o produto BT, em que B é a largura de faixa (3 dB) do filtro gaussiano e T a duração de um bit de entrada do modulador.

Após a modulação, o sinal será transmitido pela interface aérea até o outro lado da rede, onde ocorrerão as mesmas etapas, porém no caminho inverso da primeira sequência. O sinal é demodulado, recuperando-se a informação original, e decodificado com a chave de segurança. A ordem dos *bursts* é identificada e interpretada e o processo de *de-interleaving* reorganiza os bits da maneira original. Desse modo, a decodificação do canal retira os bits de controle adicionados, pois eles não fazem parte do sinal original. O sinal de voz transmitido é decodificado e a informação original transmitida é recebida.

12.9 Frequências utilizadas no sistema GSM

O GSM é utilizado mundialmente, em uma destas frequências:

- **GSM 900** – É a frequência mais comum na Europa e em outros países, na faixa dos 900 MHz.
- **GSM 1800** – Também conhecida como PCN (*personal communication network*, ou rede de comunicação pessoal), opera na faixa dos 1 800 MHz. Será a faixa de frequência a ser utilizada no Brasil.
- **GSM 1900** – É a frequência usada pelo sistema GSM nos Estados Unidos e no Canadá, na faixa dos 1 900 MHz.

12.10 Arquitetura da rede GSM

A arquitetura GSM pode ser dividida em três partes principais:

- Estações móveis (MS – *mobile station*, ou EM).
- Subsistema da estação base (BSS – *base station subsystem*).
- Sistema de comutação de rede (NSS – *network switching system*).
- Cada parte dessa arquitetura é composta por diversas entidades funcionais, cujas funções e interfaces encontram-se especificadas pelas recomendações da International Telecommunications Union (ITU) e do ETSI.

12.10.1 Estação móvel

Constituída pelo equipamento móvel (ME – *mobile equipment*) e por um cartão inteligente denominado módulo de identidade do subscritor (SIM – *subscriber*

identity module). O cartão SIM contém os dados associados ao número telefônico do usuário, permitindo-lhe acesso aos serviços de rede independentemente do equipamento móvel utilizado. A ligação de rádio entre a estação móvel e o subsistema da estação base (BSS) é denominada interface “1”. Cada ME possui um número de identificação internacional, chamado *international mobile equipment identity* (IMEI).

12.10.2 Subsistema da estação base (BSS)

É composto por duas partes:

- **BTS (base transceiver station)** – Favorece as conexões na interface aérea com a estação móvel. Formada pelo *hardware* de RF (transceptores) e por um conjunto de antenas.
- **BSC (base station controller)** – Responsável pelo controle de um grupo de BTS, ou seja, a parte de *software* do sistema.

A comunicação entre BTS e BSC é feita por meio da interface padronizada Abis, possibilitando a interoperação de componentes oriundos de diversos fornecedores. Os controladores de estação base (BSCs) comunicam-se com a central de comutação móvel (MSC – *mobile switching center*), situada no subsistema de rede (NS – *network subsystem*), por meio da interface A.

12.10.3 Sistema de comutação de rede (NSS)

É responsável pelas funções de comutação das chamadas dos usuários e controle e gerenciamento da mobilidade e da base de dados dos assinantes. É formado pelos seguintes subsistemas:

- Central de comutação móvel (MSC – *mobile services switching centre*).
- Registro de localização local (HLR – *home location register*).
- Centro de autenticação (AuC – *authentication centre*).
- Registro de localização de visitante (VLR – *visitor location register*).
- Registro de identidade do equipamento (EIR – *equipment identity register*).
- Função de interfuncionamento (IWF – *interworking function*).
- Supressor de eco (EC – *echo canceler*).

A **MSC** é responsável pela comutação das chamadas e pelas funcionalidades de gestão das subscrições das estações móveis, além de efetuar a ligação da rede GSM à rede de telefonia fixa. O encaminhamento das chamadas na rede GSM é realizado com o auxílio dos registros **HLR** e **VLR**, que armazenam informações administrativas dos usuários, incluindo a localização da estação móvel.

O registro de identidade do equipamento **EIR** contém uma lista de todas as estações móveis válidas (com permissão de utilizar a rede). O registro de autenticação **AuC** é uma base de dados que armazena uma cópia do código secreto contido em cada cartão SIM da rede, sendo utilizado para autenticação dos usuários e encriptação dos dados (figura 12.9).

Centre é usado no
Reino Unido e Center
nos Estados Unidos.

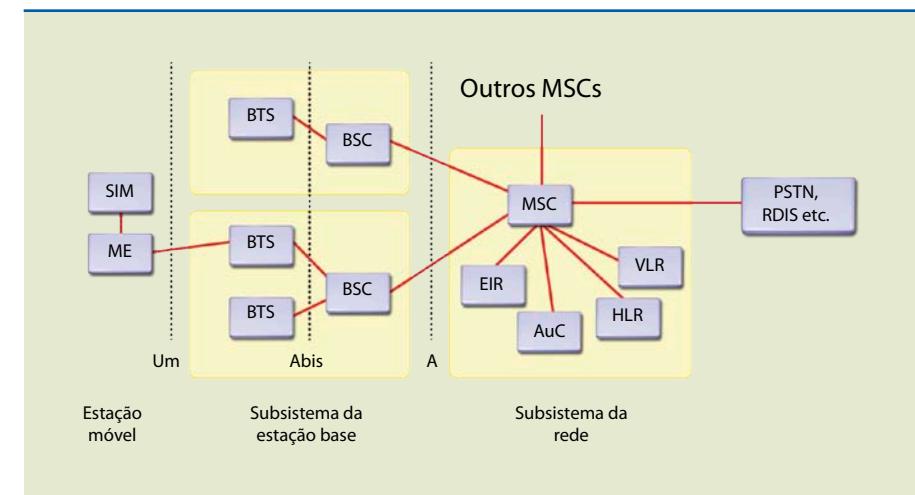


Figura 12.9
Componentes da arquitetura GSM.

12.11 Handover

No sistema GSM, existem quatro níveis de *handover*, referentes à transferência das chamadas entre as seguintes entidades:

- Canais (*slots*) em uma mesma célula.
- Células sob controle de um mesmo controlador de estação base (BSC) – inter-BTS.
- Células sob controle de BSCs diferentes, porém associados a uma mesma central de comutação móvel (MSC) – inter-BSC.
- Células associadas a diferentes MSCs – inter-MSC.

Os dois primeiros níveis, denominados *handovers* internos, envolvem apenas um BSC e são geridos sem a intervenção da MSC. Os outros dois, denominados *handovers* externos, são geridos pelas MSCs.

Os *handovers* podem ser iniciados tanto pela estação móvel como pela MSC. Durante seus *slots* vazios, a estação móvel monitora o canal BCCH de até 16 células vizinhas, formando uma lista das seis melhores candidatas para um possível *handover* pela medição da taxa de erro de bit (BER – *bit error rate*). Essa informação é então passada para o BSC e para a MSC, pelo menos uma vez por segundo.

Para que uma estação móvel saiba quando receberá uma nova chamada, ela consulta as mensagens de paginação difundidas no canal de *paging* da célula. Para garantir que a mensagem de paginação seja difundida na célula em que a estação móvel se encontra, uma abordagem extrema deveria obrigar a transmissão da mensagem de paginação em todas as células que compõem a rede, porém isso representaria um *overhead* significativo. No outro extremo, a estação móvel poderia informar sua localização a cada mudança de célula, mas isso também causaria impacto.

O *handoff* no GSM é semelhante ao D-AMPS, pois os terminais móveis decidem quando devem fazer as efetuações, medindo as estações vizinhas com os *slots* disponíveis.

12.12 Transmissão de dados na rede GSM

A transmissão de dados no sistema GSM pode ser feita por meio de duas tecnologias: GPRS e EDGE.

O **general packet radio service (GPRS)** acrescenta à infraestrutura da rede GSM o recurso de transmissão de dados por pacote, utilizando protocolo IP, o que permite mobilidade e conectividade, gerando a integração dos serviços de voz e dados. Isso possibilita aos usuários acesso à internet e a outros serviços, a uma velocidade de até 115 kbytes/s. Tais serviços são cobrados somente quando os usuários estão enviando ou recebendo dados. Os benefícios são:

- Maior velocidade de dados e mobilidade *always on*.
- Conexão quase instantânea.
- Acesso a uma abundância de dados ao redor do mundo, por meio da sus-tentação.
- Para múltiplos protocolos, incluindo o IP.
- O primeiro passo para os serviços 3G.

Para implementar o GPRS, é necessário adicionar novos elementos de rede e interfaces e atualizar os elementos da arquitetura GSM existentes. Nessas condições, deve-se prover o roteamento da distribuição de dados entre o terminal móvel e um nó do *gateway*, que permitirá a conexão com as redes de dados externas e o acesso à internet e a intranets.

Os principais elementos da arquitetura GPRS são:

- **PCU (packet control unit)** – A unidade de controle de pacotes é responsável por prover as interfaces físicas e lógicas que permitem a transferência de tráfego de dados por pacotes do BSS para um servidor de nó de suporte GPRS, o SGSN (*serving GPRS support node*). O tráfego de voz continua sendo transportado da maneira tradicional, ou seja, do BSS até a MSC.
- **SGSN (serving GPRS support node)** – É um novo nó ou ponto de rede introduzido pela rede GSM. Ele pode ser visto como uma MSC de comutação por pacotes, com a função de prover o ponto de acesso das estações móveis à rede de dados GPRS, além de gerenciar a mobilidade durante a conexão, criptografia e compressão de dados e tarifação.
- **GGSN (gateway GPRS support node)** – O *gateway* de nó de suporte GPRS provê as interfaces de conexão com redes externas, como internet (protocolo IP) e PDN (*packet data network*). Tem como funções o mapeamento das informações de roteamento e dos endereços de rede e assinantes e a tarifação dos dados.
- **DNS (domain name service)** – Assim como na internet, pode-se identificar um elemento da rede GPRS utilizando nomes em vez de um endereço IP. A associação de um nome com o endereço IP de cada elemento é feita por meio de um serviço de resolução de domínio (DNS).
- **DHCP (dynamic host configuration protocol)** – O protocolo de configuração dinâmica de *host* atribui endereços IP aos *hosts* (clientes DHCP-computadores, celulares, *palmtops* conectados à internet) das redes IP.

O DHCP atribui um endereço IP ao cliente por um intervalo de tempo limitado, ou seja, durante uma conexão.

- **RADIUS (remote access dial in user service)** – O serviço de acesso remoto ao usuário por linha discada provê ao usuário que acessa a rede por linha discada as funcionalidades de autenticação (verificação de usuário e senha), autorização e tarifação do acesso.
- **Firewall** – Dispositivo de segurança que protege o usuário de ataques externos (*hackers*) e vírus.
- **APN (access point name)** – O nome do ponto de acesso é usado para designar determinada aplicação à estação móvel, como envio de mensagens multimídia (MMS), acesso à internet e envio de *e-mails*.

Como podemos ver, assim como a internet, o GPRS tem, além desses elementos comuns a uma rede de computadores, uma camada de protocolos, responsável pela conexão da rede GSM com as redes de comunicação por pacotes. Também possui um conjunto de canais físicos e lógicos para comunicação.

A tecnologia **EDGE (enhanced data rates for global evolution)** permite que as redes GSM/GPRS possam ser atualizadas para acomodar a terceira geração de serviços de telefonia móvel, com velocidade de transmissão de dados de até 384 kbytes/s, aumentando a eficiência do espectro de frequências em até três vezes para tráfego de dados e utilizando as licenças de banda existentes. A rede é idêntica à GPRS, com diferenças apenas na interface aérea e nos elementos BTS e MS, agregando ao sistema GPRS as seguintes funcionalidades:

- Novas facilidades no protocolo de acesso à interface aérea entre estações móveis e BSS.
- Modulação 8-PSK (8-state phase shift keying).
- Melhoria na codificação de canal.

12.13 Terceira geração celular (3G)

A finalidade dos primeiros sistemas celulares analógicos (1G), como o AMPS, era prover um serviço de voz ao usuário que garantisse a mobilidade dentro de sua área de cobertura. Com a digitalização da rede celular, surgiram os sistemas 2G, como o TDMA, o CDMA e o GSM, capazes de transportar voz e dados a baixas taxas de transferência. Com o avanço e popularização da internet, o perfil dos usuários começou a mudar. Os sistemas celulares então começaram a evoluir, visando a adaptar-se à crescente demanda por novos serviços e aplicações. Deixaram de ser apenas um “telefone” e se transformaram em computadores de pequeno porte, provendo acesso à internet, serviço de *e-mail*, download de aplicativos, dando origem à terceira geração de telefonia celular.

A ampla gama de serviços oferecidos pelo 3G se deve à capacidade de sua rede de suportar maior número de clientes de voz e dados, ter melhor eficiência espectral e apresentar maiores taxas de dados a um custo de implantação menor que na segunda geração.

A padronização da tecnologia 3G começou em 1989, quando a ITU divulgou um documento com as características gerais do sistema, os requisitos mínimos de operação e as restrições. Surgiu então o padrão IMT-2000 (*international mobile telephony 2000*). Com base nesse padrão, as empresas de telefonia e órgãos reguladores do mundo inteiro passaram a estudar e propor soluções para a criação de uma tecnologia que atendesse às demandas do IMT-2000.

Os primeiros serviços utilizando tecnologia 3G foram introduzidos na Europa em 2003, no Reino Unido e na Itália. Devido a custos relacionados a licenciamento de novas frequências para operação, a implantação da rede foi adiada em alguns países.

Pelo padrão IMT-2000, o usuário pode ser classificado, no que diz respeito a sua mobilidade, como:

- Estacionário: 0 km/h.
- Pedestre: até 10 km/h.
- Veicular: até 100 km/h.
- Veicular de alta velocidade: até 500 km/h.
- Aeronáutico: até 1 500 km/h.
- Satélite: até 27 000 km/h.

São prestados serviços de: voz, áudio, texto, imagem, vídeo, sinalização e dados.

Quanto às células, são dos seguintes tipos, de acordo com o tamanho:

- Megacélula: de 100 a 500 km de raio.
- Macrocelula: até 35 km de raio.
- Microcélula: menor que 1 km de raio.
- Picocélula: até 50 m de raio.

Com base nesses requisitos propostos, diversas empresas e órgãos reguladores do mundo apresentaram à ITU 13 propostas de sistemas 3G, sendo as mais importantes:

- WCDMA (*wideband CDMA*).
- CDMA 2000 (evolução do IS-95).
- UMTS (*universal mobile telecommunications system* – evolução do GSM).
- TD-SCDMA (*time division synchronous CDMA*).

Analizando essas propostas, concluiu-se que as tecnologias UMTS e CDMA 2000 seriam as mais propícias, devido à facilidade de migração dos sistemas GSM e IS-95 para elas.

Pode-se dizer que uma rede 3G é baseada em dois princípios:

- Comunicação banda larga via rádio.
- Serviços baseados em IP.

Dessa maneira, a rede 3G apresenta os seguintes benefícios:

- Maior velocidade de transmissão de dados e mobilidade/conexão permanente.
- Conexão quase instantânea.
- Conexão com dados suportando diversos protocolos, incluindo IP.

12.13.1 Migração para a rede 3G

A migração da telefonia móvel 2G para 3G com as tecnologias UMTS e CDMA 2000 possibilitou às operadoras reutilizar grande parte do investimento já realizado nas redes em operação, além de ser progressiva, de modo que as operadoras puderam administrar, cada uma a seu tempo, a migração de seus assinantes.

Em redes baseadas nas tecnologias GSM e TDMA, a migração para os serviços 3G é possível utilizando as tecnologias EDGE e WCDMA. Ambas têm suas vantagens, propiciando ampla gama de possibilidades e aumento da capacidade da rede. As operadoras com redes 2G em operação podem prover serviços 3G nas frequências existentes usando a infraestrutura de rede atual. Isso significa que as operadoras não precisam obter licença para faixas de frequências adicionais. Além disso, é possível construir essa rede sobre a base já existente, protegendo os investimentos já realizados, por meio da adição de *hardware* e *software* à rede já em operação.

Para operadoras GSM, o primeiro passo foi a implementação do GPRS (*general packet radio service*), introduzindo a comunicação baseada em IP em sua rede. Conforme visto anteriormente, sua origem é ligada à transmissão de pacotes, permitindo que os usuários estejam sempre conectados, porém pagando apenas pelos serviços de dados enviados e recebidos. Logo em seguida, as operadoras foram migrando para a tecnologia EDGE, incrementando a capacidade da rede de acesso via rádio para suportar os serviços 3G com até 384 kbytes/s de taxa de transmissão.

Para redes baseadas em CDMA, a escolha é o CDMA 2000, elevando as taxas de velocidade de transmissão nas redes CDMA e permitindo a oferta de novos serviços, além de oferecer aproximadamente o dobro de capacidade para tráfego de voz, em comparação com as redes CDMA de segunda geração.

12.13.2 WCDMA

O WCDMA (*wideband code division multiple access* – banda larga de múltiplo acesso por divisão de código) possui velocidade de dados mais rápida que o GPRS e o EDGE e permite ao usuário a transmissão e recepção de dados durante uma chamada, o que não é possível utilizando GPRS e EDGE.

Foi projetado para tratar serviços de multimídia que demandam grande largura de banda, com taxas de velocidade de transmissão de dados até 100 vezes superiores às taxas das redes móveis 2G (até 2 Mbytes/s), além de uma nova geração de serviços que misturam diferentes elementos de mídia, como voz, vídeo, som digital, cor, imagens e animações.

O WCDMA tem dois modos de operação:

- **Frequency division duplex (FDD)** – Os enlaces de subida e descida utilizam canais de 5 MHz diferentes e separados por uma frequência de 190 MHz.
- **Time division duplex (TDD)** – Os enlaces de subida e descida compartilham a mesma banda de 5 MHz. Em 2010 esse sistema ainda estava em desenvolvimento.

A tabela 12.2 apresenta algumas características do WCDMA utilizando FDD.

Tabela 12.2
Características técnicas
do WCDMA.

Método de múltiplo acesso	DS-CDMA (sequência direta CDMA)
Fator de reuso de frequências	1
Banda por portadora	5 MHz
Chip rate	3,84 Mcps
Frame	10 ms (38 400 chips)
Nº de slots/frame	15
Nº de chips/slot	2 560 (máx. 2 560 bits)
Fator de espalhamento no enlace de subida	4 a 256
Fator de espalhamento no enlace de descida	4 a 512
Taxa do canal	7,5 kbits/s a 960 kbits/s

12.13.3 CDMA 2000

CDMA 2000 é um padrão 3G eficiente para disponibilizar serviços de voz e de dados em banda larga de alta capacidade, com taxas de transmissão de 2 Mbits/s. Esse sistema permite também o acesso simultâneo de serviços de voz, vídeo e dados. É totalmente compatível com os padrões IMT-2000 para 3G. Foi implementado nas bandas de frequências existentes de CDMA e TDMA nas faixas de 800 e 1 900 MHz, assim como no espectro de 2 GHz, utilizado no Japão. É uma evolução do padrão CDMA baseado no IS-95 e ANSI-41.

A tecnologia CDMA 2000 1X oferece altas taxas de transmissão de dados por pacotes, aumentando a velocidade da rede e elevando a capacidade de tráfego de voz em aproximadamente duas vezes a das redes CDMA 2G. A sigla 1X significa uma vez 1,25 MHz, largura de banda padrão de uma operadora CDMA IS-95.

Manter a largura da banda padronizada para CDMA tornou ambas as infraestruturas e seus terminais compatíveis, perante as evoluções tecnológicas. Uma rede CDMA 2000 é composta de componentes de interface áerea 1X e um

backbone de dados (PCN – *packet core network*). O CDMA 2000 PCN é equivalente em funcionalidade a uma rede GPRS, mas utiliza protocolos baseados em IP móvel.

A evolução do CDMA 2000 1X é o CDMA 2000 1XEV, dividido em duas fases:

- 1XVE-DO (*data only*), voltado para tráfego veloz de dados.
- 1XVE-DV (*data and voice*), combinando voz e dados em alta velocidade em uma mesma frequência ou *carrier*.

O 1XVE-DO permitirá maior velocidade de dados para usuários CDMA de uma operadora dedicada a tráfego de dados, superior a 2 Mbits/s. O 1XEV-DV oferecerá alta velocidade para transmissão de dados e voz simultânea em uma mesma operadora, além de serviços de dados em tempo real.

12.13.4 UMTS

O padrão UMTS (*universal mobile telecommunications system*) é uma evolução dos sistemas GSM de segunda geração no que diz respeito à capacidade do sistema e taxas de transmissão de dados, possibilitando o incremento de novos serviços e facilidades oferecidas pelas operadoras de telefonia celular. Pode utilizar como interface de rádio as tecnologias WCDMA e EDGE e é totalmente compatível com as tecnologias GPRS e EDGE. Sua banda de operação básica é de 5 MHz.

A interface aérea do UMTS é chamada de UTRA (*universal terrestrial radio access*), e possui os dois modos de operação utilizados no WCDMA, divisão de frequência duplex (FDD) e divisão de tempo duplex (TDD), vistos anteriormente. No FDD são alocadas duas faixas de frequências, uma para enlace direto e outra para enlace reverso, enquanto no TDD os enlaces direto e reverso são alocados em uma única faixa, multiplexada no tempo.

Apesar de o UMTS ser baseado na tecnologia GSM, utiliza como tecnologia de múltiplo acesso o CDMA, permitindo que os usuários usem a mesma faixa de frequências durante todo o tempo, além de oferecer maior segurança ao sistema.

A arquitetura da rede UMTS é formada pelos seguintes elementos:

- **User equipment (UE)** – É o terminal móvel e seu módulo de identidade de serviços do usuário (USIM), equivalente ao cartão SIM dos terminais GSM.
- **Core network (CN)** – Rede de suporte, ou seja, núcleo da rede que suporta serviços baseados em comutação de circuitos e comutação de pacotes.
- **Universal terrestrial radio access network (UTRAN)** – Rede universal de acesso de radiofrequência terrestre.

As interfaces de ligação desses elementos são chamadas de lu e Uu, com a função de transporte de protocolos, que implementam os serviços de acesso à interface aérea e seu controle. Os protocolos de comunicação utilizados nessa arquitetura procuram manter a compatibilidade com os protocolos definidos para o GSM, principalmente no que se refere à parte do usuário. A sinalização empregada é a

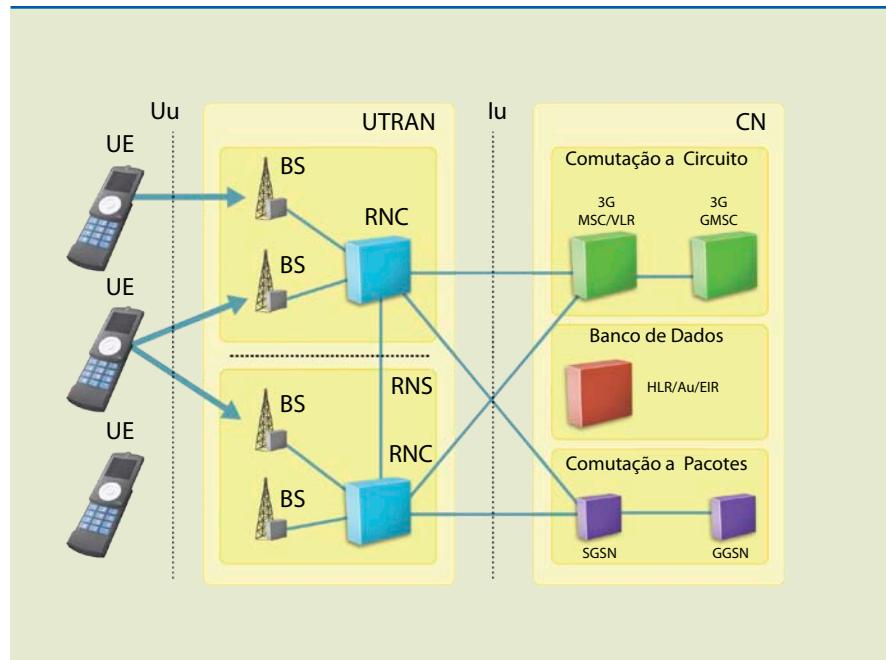


SS7, mas com algumas modificações que possibilitam suportar o transporte de dados com taxas mais altas.

A figura 12.10 dá uma ideia da arquitetura UMTS.

Figura 12.10

Arquitetura da rede UMTS.



A UTRAN é formada por um conjunto de subsistemas de rede de RF, chamado de RNS (*radio network system*), conectado à rede de suporte pela interface Iu. A RNS é dividida em RNC (*radio network controller*) e nó B (*node B*). O RNC é responsável pela conexão da interface aérea com a rede de suporte CN (gerenciamento dos recursos de RF, gerenciamento dos nós B, localização dos terminais de usuários e gerenciamento da mobilidade). O nó B faz a interconexão da interface aérea com a infraestrutura celular (controle dos sinais de RF presentes na interface aérea, dos canais físicos e espalhamento espectral).

A comunicação realizada por meio da interface rádio do UTRAN utiliza três tipos de grupos de canais, com funções semelhantes aos canais GSM:

- **Canais lógicos** – Identificam o tipo de informação transportada. Podem ser de dois grupos: de controle e de tráfego. São exemplos de canais lógicos de controle: o BCCH (*broadcast control channel*), o PCCCH (*paging control channel*), o CCCH (*common control channel*) e o DCCH (*dedicated control channel*). No grupo de canais de tráfego encontram-se o CTCH (*common traffic channel*) e o DTCH (*dedicated traffic channel*).
- **Canais de transporte** – Identificam as características de transporte dos dados pela interface aérea e são divididos em dois grupos: comuns e dedicados. Os canais comuns transportam informação comum a vários usuários – por exemplo, o BCH (*broadcast channel*) e o FACH (*forward access channel*). Os canais dedicados transportam informação para um usuário específico – por exemplo, o DCH (*dedicated channel*) e o E-DCH (*enhanced dedicated channel*).

- **Canais físicos** – Responsáveis pela codificação e transmissão dos canais de transporte pela interface aérea. São formados por quadros de RF e intervalos de tempo de canal (*time slots*). Possuem canais comuns e dedicados.

A rede de suporte CN utilizada no UMTS é a mesma implementada nos padrões GPRS e EDGE, possibilitando uma migração relativamente simples entre as redes 2G, 2.5G, 2.75G e 3G, além de garantir que os serviços desenvolvidos para essas redes possam ser utilizados na terceira geração. Esse padrão está sendo desenvolvido pelo 3GPP (responsável pela padronização da evolução do GSM para 3G), devendo incorporar, em suas versões futuras, o IP *multimedia subsystem* (IMS) em sua *core network*, o que permitirá que um usuário estabeleça uma sessão multimídia com outro usuário. Com a implantação do *high speed downlink packet access* (HSDPA) a taxa de dados poderá também ser ampliada.

O HSDPA é um serviço de transmissão de pacotes de dados que opera dentro do WCDMA, no enlace direto (*downlink*), possibilitando a transmissão de dados de até 14,4 Mbit/s em uma banda de 5 MHz, abrindo novas possibilidades de serviços multimídia que utilizam a transmissão em banda larga em telefones móveis. Esse serviço já é considerado uma tecnologia 3.5G.

12.14 Bluetooth

Bluetooth é um padrão aberto para comunicação de rádio bidirecional, de curto alcance, entre diferentes aparelhos eletrônicos, como telefones celulares, *palmtops*, *laptops* e impressoras, permitindo, ainda, a sincronização entre eles. É também importante para comunicação entre máquinas, um dos segmentos de maior potencial de crescimento nas telecomunicações. Por exemplo, suas notícias diárias podem ser transmitidas de um computador para seu PDA de maneira automática quando estiver dentro da área de cobertura de seu PC com *bluetooth*. Essa tecnologia opera na faixa de frequência de 2,4 GHz, reservada pela Anatel para a operação de equipamentos de radiação restrita, sem necessidade de licença de operação.

As principais características do *bluetooth* são:

- Técnica de espalhamento espectral com salto de frequências (SS/FH – *spread spectrum-frequency hopping*).
- Taxa de transferência de dados: até 1 Mbit/s.
- Distância entre dispositivos: de 10 a 100 m, utilizando amplificadores.
- Transferência de voz e dados combinados no mesmo meio físico.
- Baixa potência: de 0 dBm a 10 m e de 20 dBm a 100 m de distância.
- Baixo custo.

A tecnologia *bluetooth* foi desenvolvida pela Ericsson em meados da década de 1990, mas hoje está sob os cuidados Bluetooth Special Interest Group (SIG), um grupo de diversos fabricantes de equipamentos de telecom, computadores e componentes eletrônicos que fomenta o desenvolvimento e aplicações baseadas nessa tecnologia. Seu nome foi escolhido em homenagem a Harald Bluetooth (Dente Azul), rei da Dinamarca no século IX. Segundo a lenda, ele recebeu esse apelido porque possuía na arcada dentária uma incrustação azulada.

Capítulo 13

Redes de computadores



No início da implementação dos sistemas computacionais, o propósito era agilizar o processamento de informações com o objetivo de elevar a produtividade das tarefas repetitivas, mantendo a qualidade e a baixa probabilidade de erros. No entanto, ao longo dos anos, percebeu-se que, além dessas possibilidades, a computação poderia ser colaborativa. Com isso, haveria maior redução de custos, pois as máquinas das corporações compartilhariam recursos e softwares, e todo o gerenciamento seria feito por uma única máquina de grande porte (servidor).

Pensando nessas vantagens, surgiu o conceito de rede de computadores (rede de comunicação de dados), constituída de tecnologia proprietária; atualmente, a tecnologia é do tipo aberta.

Define-se rede de computadores como um conjunto de linhas e nós em que cada nó pode ser representado por um dispositivo pertencente à rede, e linha é o meio físico capaz de interconectar os nós.

Inicialmente, as redes públicas foram desenvolvidas para realizar apenas um tipo de serviço: tráfego de voz (telefonia); portanto, eram consideradas redes monosserviço. Mais tarde, com o desenvolvimento tecnológico e novas demandas do mercado, tornaram-se redes de acesso de dados e redes *backbone*, consideradas redes multiserviço. Entretanto, a necessidade de integração de serviços fez surgir a rede digital de serviços integrados (RDSI, ou *integrated service digital network* – ISDN).

Assim como os serviços, as redes telefônicas privativas também evoluíram. A princípio surgiram os PABX, seguidos da implementação da rede mundial de comunicação de dados, e as grandes empresas deram importância às redes do tipo mestre-escravo, transformadas, posteriormente, nas redes cliente-servidor.

Os computadores são máquinas síncronas desenvolvidas para processar **dados** e realizar tarefas repetitivas de modo muito mais rápido que o ser humano. Se estiverem programados de maneira adequada, as chances de ocorrerem erros de processamento são mínimas.

No início, a computação era centralizada, ou seja, cada máquina tinha de ter instalados os softwares necessários para seu funcionamento, além de periféricos

externos, como impressoras, *modems*, *scanners* etc. Com a implantação das redes de computadores, surgiram os processos compartilhados, em que uma máquina de maior porte é responsável por gerenciar as demais pertencentes à rede; um *software* de controle é instalado nessa máquina e as outras apenas necessitam de licença para sua utilização. Além dos softwares, os computadores interligados em rede compartilham os periféricos externos instalados na máquina de maior porte, também chamada de servidor, reduzindo o custo de implantação do projeto. Esse modelo é conhecido como computação colaborativa.

As redes de computadores podem ser classificadas de acordo com a distância de abrangência:

- **Redes LAN (*local area network*)** – São as conhecidas redes locais, que interligam máquinas a pequenas distâncias, de dezenas de metros, muito utilizadas em redes internas de corporações e estabelecimentos.
- **Redes MAN (*metropolitan area network*)** – Interligam máquinas ou nós a distâncias de centenas de metros ou algumas unidades de quilômetros.
- **Redes WAN (*wide area network*)** – Interligam máquinas a distâncias de dezenas ou até centenas de quilômetros. É o caso da chamada rede mundial de computadores.

Existem três padrões para implementação de redes LAN, mantidos pelo Comitê 802 do Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). São eles:

- Ethernet: rede Windows, Windows NT, Windows 2000, Windows XP, Novell etc.
- Token Ring: IBM.
- Arc Net: padrão antigo.

Atualmente o padrão Ethernet é o mais utilizado, pelos seguintes motivos:

- Baixo custo.
- Grandes velocidades.
- Tecnologia bem conhecida.
- Capacidade de trabalhar com grande número de equipamentos.

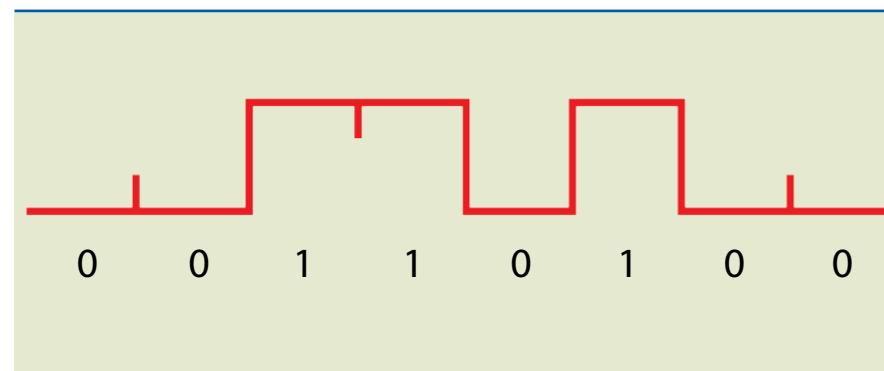
13.1 Comunicação entre computadores

A rede de comunicação pressupõe a comunicação entre pelo menos dois pontos (computadores) diferentes. À medida que os sinais são processados, após o tratamento de dados, eles seguem por terminais de saída, garantindo troca de informações entre as máquinas. No tema redes de computadores, o que nos interessa são os dados introduzidos no computador, ou seja, os bits, que são os dígitos binários. As sequências de bits em série são transmitidos pelas redes de comunicação quando um computador se comunica com outro.

Os dados binários (bits), que teoricamente são obtidos por meio de dois níveis de amplitude de tensão elétrica (0 ou 1), assemelham-se a pulsos (figura 13.1).

Figura 13.1

Dados binários.



Segundo estudos do matemático francês Fourier, sinais periódicos podem ser decompostos em séries (normalmente) infinitas de senos e cossenos, chamadas séries de Fourier, cuja expressão é dada por:

$$g(t) = C/2 + \sum a_n \cdot \sin(2\pi f_n t) + \sum b_n \cdot \cos(2\pi f_n t) \quad (13.1)$$

Para o caso específico de trens de bits, consegue-se matematicamente demonstrar que eles podem ser reproduzidos por série infinita composta por uma frequência fundamental mais suas harmônicas ímpares (ou seja, sinais com frequência 3, 5, 7, ... vezes a frequência fundamental), na qual os valores dos parâmetros a_n , b_n e c , dependerão da sequência de bits. A componente c , em particular, corresponde ao nível DC do trem de bits.

A sequência de bits equivale a:

Seq. bits = fundamental + terceira harmônica + quinta harmônica + ... + infinitas componentes

Essa propriedade facilita o dimensionamento da rede.

Exemplos

- 1.** Dado o trem de bits ...0001000100010001... (repetição a cada 4 bits), infinito, a uma velocidade de transmissão de 1 000 bps (bits por segundo), quais são as componentes da série de Fourier correspondente?

Solução:

Fundamental = 1 000 bps / 4 bits = 250 Hz

Terceira harmônica = $250 \cdot 3 = 750$ Hz

Quinta harmônica = $250 \cdot 5 = 1250$ Hz

Sétima harmônica = $250 \cdot 7 = 1750$ Hz

Nota: as harmônicas pares possuem potência zero.

- 2.** E para o trem de bits ...001001001001..., também, infinito, à mesma velocidade?

Solução:

Fundamental = 1 000 bps / 3 bits = 333,33... Hz

Terceira harmônica = 999,99... Hz

Quinta harmônica = 1 666,66... Hz

Sétima harmônica = 2 333,33... Hz

...

No caso real entre dois computadores se comunicando, a velocidade é constante nos momentos em que há troca de dados, porém não temos controle sobre o período de repetição dos bits. Dessa maneira, não conseguimos determinar com exatidão as componentes que formam esse sinal. Entretanto, podemos calcular o pior caso, que é a variação máxima entre 0 e 1. Por exemplo: ...01010101... a 1 000 bps:

Fundamental = 1 000 bps / 2 bits = 500 Hz

Terceira harmônica = 1 500 Hz

Quinta harmônica = 2 500 Hz

Sétima harmônica = 3 500 Hz

...

As sequências 0000 e 1111 correspondem apenas ao nível DC, as quais não geram múltiplas harmônicas.

De outro lado, aumentando a velocidade do trem de bits, também aumentam as frequências das componentes da série de Fourier correspondente, com a seguinte correlação:

$$F_{\text{fundamental}} = V_{\text{TX}} / T \quad (13.2)$$

em que:

- $F_{\text{fundamental}}$ é a frequência da fundamental correspondente ao trem de bits;
- V_{TX} a velocidade de transmissão do trem de bits;
- T o período de repetição dos bits.

Denomina-se banda passante de um sinal o intervalo de frequências (da mais baixa à mais alta) correspondente às diferentes componentes desse sinal. Por exemplo: a banda passante do trem de bits ...01010101... a 1 000 bps é de 500 Hz a infinito.

13.2 Meios de transmissão

São meios físicos por onde trafegam os sinais (dados) em uma rede de comunicação. Existem basicamente dois tipos de meios de transmissão:

- Cabos (*wireline*).
- Espaço livre (*wireless*).

A decisão de qual meio físico é o mais adequado em um projeto de rede de comunicação depende de alguns fatores:

- Tipo de rede (local ou grande distância).
- Serviço que será oferecido.
- Distâncias a serem percorridas.
- Relevo do terreno.
- Número de multiplexações a serem transmitidas.

13.2.1 Transmissão via cabos

Quando a transmissão for realizada por cabos, devemos considerar os tipos de cabos disponíveis: cabos metálicos, capazes de conduzir sinais elétricos, podendo ser dos tipos coaxial ou par trançado, e cabos ópticos, capazes de conduzir sinais luminosos, divididos em monomodo e multimodo (índice degrau ou gradual).

Ao escolhermos o tipo de cabo, temos de levar em conta também se ficará em via externa ou interna, se será aéreo ou subterrâneo.

De maneira geral, os cabos têm as seguintes características:

- **Cabos de par trançado** – Apresentam baixo custo, fácil instalação e manutenção, porém baixa capacidade de transmissão em bps.
- **Cabos coaxiais** – São os de melhor qualidade quanto à capacidade de transmissão de dados, com excelente blindagem contra interferências eletromagnéticas.
- **Cabos ópticos** – Possuem enorme vantagem quanto a dimensões, peso, flexibilidade e imunidade a ruídos.

13.2.2 Transmissão via espaço livre

Para que uma transmissão via espaço livre seja realizada, é necessário utilizar sistemas de rádio, os quais podem ser terrestres ou via satélite.

As faixas de frequências empregadas na transmissão de dados são:

- UHF (*ultra high frequency*): ondas de 1 m a 10 cm de comprimento.
- SHF (*super high frequency*): ondas de 10 cm a 1 cm de comprimento.

De modo geral, quanto maior a frequência de RF, maior será a capacidade do sistema de rádio, porém menor a capacidade de vencer obstáculos.

Os sistemas de transmissão via satélite podem ser de:

- Órbita geoestacionária (GEO): sobre a linha do equador a uma distância de aproximadamente 36 000 km da superfície terrestre.
- Órbita de média altura (MEO): distância de aproximadamente 8 000 a 14 000 km da superfície terrestre.

- Baixa órbita (LEO): distância de aproximadamente 800 a 1 400 km da superfície terrestre.
- Órbita altamente elíptica em relação à Terra (HEO).

13.3 Soluções abertas e fechadas de redes de comunicação de dados

No início das implementações das redes de comunicação de dados, as empresas que dominavam projetos de *hardware* e *software* desenvolviam produtos que somente poderiam ser instalados em redes oferecidas por elas, pois não havia interconectividade nem interoperabilidade entre sistemas de fabricantes diferentes.

Essas condições limitavam o pós-venda, pois todos os equipamentos sobressalentes e mesmo os serviços de manutenção e/ou atualização do projeto apresentavam custo elevado, por causa do monopólio da tecnologia proprietária. Para resolver esse problema, foram desenvolvidos métodos para padronização de *hardware* e *software* no contexto mundial, possibilitando ampliar a oferta de produtos e serviços para diferentes fabricantes e não mais apenas um.

As vantagens das soluções fechadas de redes de comunicação sobre as abertas são a otimização na interoperabilidade e a transparência de facilidades, e a principal desvantagem, o monopólio.

As soluções abertas apresentam como principal vantagem a padronização mundial, apesar de serem mais complexas devido às diferentes tecnologias. Nesse sistema, as desvantagens são: não transparência de facilidades; maior lentidão no processo, por causa do maior número de processamentos; maior probabilidade de ocorrerem erros durante o funcionamento.

Para implementar soluções abertas de redes de comunicação, foram criados órgãos responsáveis por elaborar e fazer valer regras de interconectividade e interoperabilidade. Dessa maneira, surgiram os seguintes padrões:

- **Padrões de direito** – Aqueles definidos pelos órgãos responsáveis por certificações e padronizações de produtos e serviços (ISO, ABNT, ITU etc.).
- **Padrões de fato** – Aqueles definidos pelo próprio mercado, por meio dos fóruns das diversas áreas afins, de acordo com a divulgação de documentos chamados Request for Comments (RFCs), os quais reúnem regras a serem respeitadas por fornecedores de produtos e serviços, com o objetivo de tornar as soluções abertas.

13.4 Conexão física

Como os trens de bits são a forma mais natural de representar os dados, o ideal seria transmiti-los diretamente na rede por meios físicos. No entanto, a maior rede já existente é a rede de telefonia fixa comutada (RTFC), a qual não tem capacidade de transportar bits, porque sua banda passante é de 3,4 a 4 kHz.



A solução foi transportar os bits por meio de uma onda portadora (amplitude, fase ou frequência). Isso é possível com a utilização de *modems*, aparelhos que modulam e demodulam os dados a serem transmitidos, ou seja, são os telefones dos computadores. Essa transmissão é chamada de analógica.

Na transmissão analógica, os bits são transmitidos indiretamente, isto é, não são os bits que são transmitidos, e sim as frequências correspondentes aos níveis lógicos dos bits. Essas frequências, denominadas portadoras, cabem dentro de um canal telefônico de 4 kHz moduladas pelo trem de bits a ser transmitido e recuperado no destino, pela demodulação das portadoras transmitidas.

Segundo o teorema de Shannon, a capacidade de um canal telefônico é dada por:

$$V_{T\text{MÁX}} = W \cdot \log_2 (1 + S/N) \quad (13.3)$$

em que:

- $V_{T\text{MÁX}}$ é a máxima velocidade de transmissão de dados pelo canal, em bps;
- W , a largura de banda do canal, em Hz;
- S/N , a relação sinal/ruído do canal, em dB.

Como na prática os canais telefônicos analógicos de 3,4 kHz têm relação sinal/ruído em torno de 30 dB, o limite teórico de transmissão de dados nesses canais é de cerca de 33 600 bps.

Quando se diz que os *modems* V.90 alcançam velocidade de 56 kbps, não significa que o teorema de Shannon foi ultrapassado. Na realidade, o que ocorre é:

- A transmissão entre usuário e rede é analógica (limitada em 33 600 bps).
- A transmissão entre rede e usuário é digital, por isso alcança a velocidade de 56 000 bps.

A transmissão analógica é ainda muito utilizada, mesmo porque o acesso à internet se dá em grande parte dos casos por linha discada.

A tendência é que todas as redes passem a transmitir dados de maneira digital, por meio de redes específicas de altíssimas velocidades (por exemplo, rede fotônica).

Na transmissão digital, também são necessários equipamentos de interface, pois os bits não são apropriados para transmissão direta ao meio físico. Isso porque possuem nível DC e, no caso de transmissões longas de 0 e/ou 1, o receptor perderia o sincronismo de transmissão. Esses equipamentos de interface fazem, no mínimo, a conversão de código, adequando a transmissão dos trens de bits aos meios que serão utilizados. Devido à semelhança com a transmissão analógica, são chamados de *modems* digitais ou *modems* banda base, embora, nesse caso, não exista modulação alguma.

Vale lembrar que não se devem confundir:

- **Velocidade de transmissão** – É medida em bps e seus múltiplos. É a velocidade com que a interface do computador lança os bits no meio de transmissão.
- **Velocidade de propagação** – É medida em km/s. É a velocidade com que os sinais elétricos ou ópticos se propagam nos meios de transmissão.
- **Velocidade de modulação** – É medida em bauds.

$$V_{\text{mod}} = V_{\text{TX}} / A \quad (13.4)$$

em que:

- V_{mod} é a velocidade de modulação;
- V_{TX} , a velocidade de transmissão;
- A , a quantidade de bits necessária para provocar uma modulação.

- **Velocidade efetiva** – É medida em bps e seus múltiplos. É a velocidade com que determinada mensagem consegue ser transmitida integralmente e sem erros por meio de uma rede. Essa velocidade depende:
 - da quantidade de retransmissões;
 - do cabeçalho do protocolo (*overhead*) – bits não úteis;
 - das características de funcionamento do protocolo;
 - de todos os atrasos ocorridos na transmissão;
 - dos meios compartilhados, de quantos nós compartilham o mesmo meio.

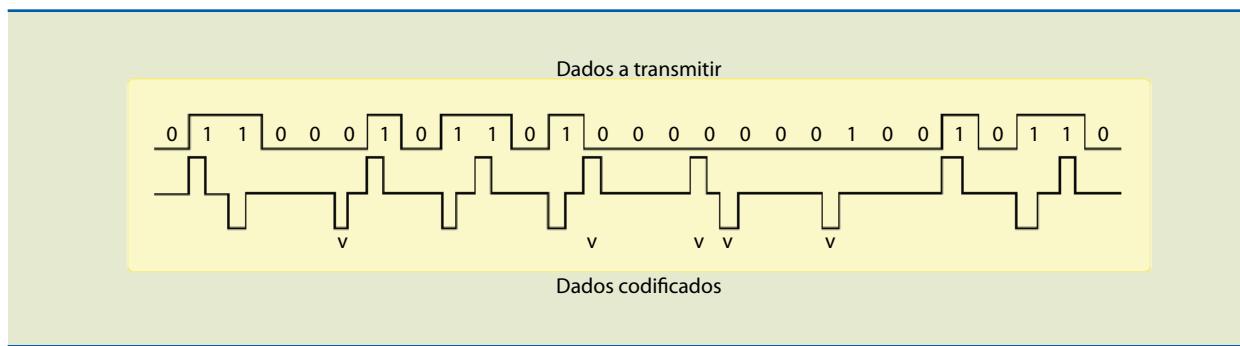
A padronização da conexão física engloba os seguintes aspectos:

- Mecânicos: dimensões, formato e quantidade de pinos dos conectores da interface.
- Funcionais: função de cada pino.
- Elétricos: limites previstos para os níveis de tensão e corrente dos diferentes sinais, tempo de duração de cada bit.
- Procedurais: troca de sinais entre os nós.

13.5 Codificação dos dados

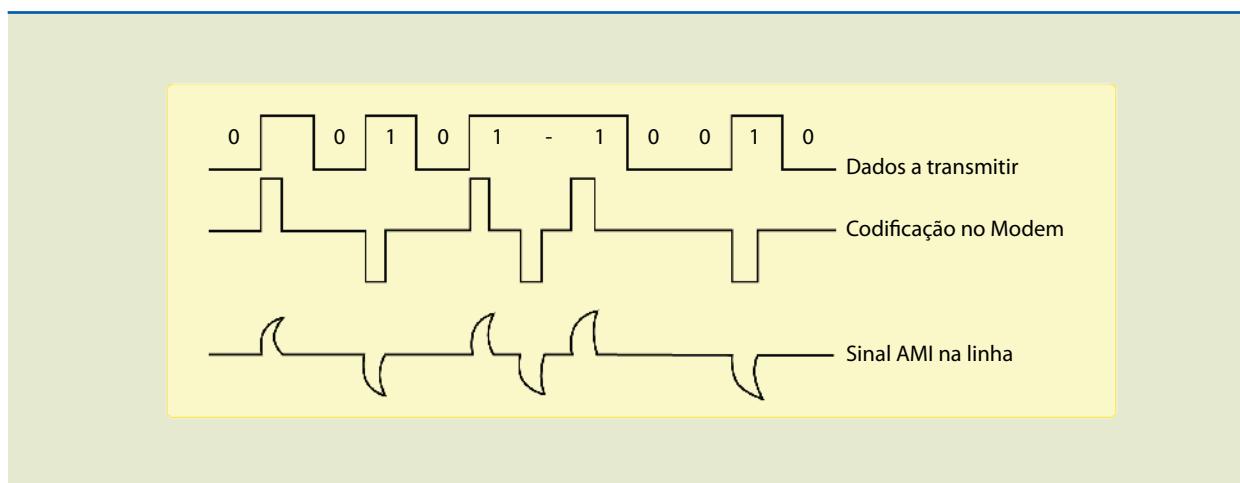
Os bits possuem nível DC, que deve ser eliminado, pois não contém informação, somente dissipar energia em forma de calor, o que não interessa em uma transmissão. Por esse motivo, os bits são codificados antes de serem lançados no meio físico. Alguns métodos de codificação são HDB-3 e AMI.

O código **HDB-3** (*high density bipolar with 3 zeros*) tem a característica de, a cada 4 zeros transmitidos, ser enviado 1 bit de violação V, que tem a mesma polaridade do pulso anterior. No HDB-3, os quatro zeros consecutivos são substituídos pela sequência **000V** ou **V00V**, em que V é a violação, e a substituição dependerá do último pulso transmitido (figura 13.2).

**Figura 13.2**

Código HDB-3.

A codificação AMI (*alternate mark inversion*) utiliza três marcas de sinais (+, 0, -) para codificar a informação binária a ser transmitida (figura 13.3). O bit 0 é representado por 0, enquanto o bit 1 corresponde a pulsos retangulares com metade da duração do dígito e polaridade alternada (+ ou -).

**Figura 13.3**

Codificação AMI.

O código AMI elimina o nível DC, porém pode haver perda de sincronismo em casos de sequências longas de zeros.

13.6 Protocolos de comunicação

Para que dois ou mais nós se comuniquem, é necessário que haja regras de comunicação. Essas regras são chamadas de protocolos. Os protocolos estão relacionados com a disciplina de controle da rede, que pode ser síncrona (BSC, VIP, SDLC etc.) ou assíncrona (*start/stop*), ambas em rede de longa distância (CSMA/CD, token passing, SMA etc.).

Outra característica dos protocolos é com relação a sua orientação, isto é, as informações podem ser tratadas como bits ou bytes. Os primeiros protocolos eram do tipo *start/stop* (baixa velocidade). Na década de 1960, surgiram os protocolos orientados a bytes (caracteres); entre os principais encontram-se:

- BSC (*binary synchronous communication*), da IBM.
- VIP (*visual impression projection*), da Honeywell.

Em 1973, apareceram os protocolos orientados a bits, destacando-se:

- SDLC (*synchronous data link control*), da IBM.
- BDLC (*Burroughs data link control*), da Burroughs.
- HDLC (*high data link control*), da International Organization for Standardization (ISO).
- X.25, do Comité Consultatif International de Télégraphique et Téléphonique (CCITT).
- ADCCP (*advanced data communication control procedures*).
- Os protocolos proporcionam integridade de transmissão, identificação e possível correção de erros de transmissão, garantindo baixa taxa de erros de transmissão.

13.7 Métodos de detecção de erros

Erros na transmissão ocorrem por diversos motivos, e os protocolos devem ser capazes de identificar e, se possível, corrigir os erros de transmissão de dados. Existem vários métodos de identificação e correção de erros de transmissão: paridade de caractere, paridade combinada, método ou código da razão constante, método de Hamming e método polinomial.

O **método polinomial ou CRC (*cyclic redundancy check*)** é considerado o mais eficiente. Nele, os dados a serem transmitidos são convertidos em um polinômio $D(x)$ em função dos 0s e 1s. O polinômio $D(x)$ é multiplicado pelo termo de maior grau de um polinômio gerador $G(x)$, cujo resultado é o polinômio $D'(x)$, o qual é dividido pelo polinômio gerador $G(x)$. O resultado $R(x)$ dessa divisão será enviado ao término da transmissão de $D(x)$. Na recepção, os dados são divididos pelo mesmo polinômio $G(x)$. Se o resto da divisão for zero, não houve erro durante a transmissão; caso contrário, há necessidade de nova transmissão.

Exemplo:

Consideremos o seguinte item de bits de transmissão = 10111011 = $D(x)$

Solução:

$$G(x) = X^3 + X^2 + X = 1110$$

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

↳ Maior expoente de $G(x)$

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

$$\begin{array}{r} & & & \cdot X^3 \\ D'(x) = & X^{10} + X^8 + X^7 + X^6 + X^4 + X^3 & & \end{array}$$

$$D'(x) \div G(x) = X^7 + X^6 + X^5 + X^4 + X^3 + 1$$

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



Portanto, a mensagem a ser transmitida será:

10111011110

└ Resto

13.8 Modelo OSI de arquitetura

No final da década de 1970, o desenvolvimento tecnológico na área de comunicações crescia vertiginosamente, ao mesmo tempo que aumentava em grande escala a heterogeneidade de padrões entre fabricantes, o que praticamente impossibilitava a interconexão entre sistemas de fabricantes distintos. Surgiu, então, a necessidade de atingir novos padrões mundiais, que podem ser assim resumidos:

- **Interoperabilidade** – É a capacidade que os sistemas abertos possuem de troca de informações entre si, mesmo que sejam fornecidos por fabricantes diversos.
- **Interconectividade** – É a maneira pela qual se podem conectar computadores de fabricantes distintos.
- **Portabilidade de aplicação** – É a capacidade de um *software* ser executado com uma performance aceitável em computadores de capacidades diversas, desde computadores pessoais até supercomputadores.

Para atingir esses padrões, a International Organization for Standardization (ISO) passou a desenvolver um padrão de arquitetura aberta e baseada em camadas. Foi então definido o Modelo de Referência para Interconexão de Sistemas Abertos (Reference Model for Open Systems Interconnection – RM-OSI).

A utilização de um ambiente de sistema aberto oferece algumas vantagens, como:

- Liberdade de escolha entre soluções de diversos fabricantes.
- Acesso rápido a novas tecnologias e com preços mais acessíveis, pois é mais barato e rápido fabricar produtos em uma plataforma-padrão.
- Redução de investimentos em novas máquinas, pois os sistemas e os *softwares* de aplicação são portáteis para os vários tipos de máquinas existentes.

O modelo OSI possibilitou, assim, que as máquinas distintas se comuniquem e troquem informações, pois ele possui sete camadas, cada uma delas responsável por uma função específica. Os princípios utilizados para chegar a essas camadas foram:

- Uma camada deve ser criada onde é necessário um nível de abstração diferente.
- Cada camada deve desempenhar uma função bem determinada.
- A função de cada camada deve ser determinada tendo em vista a definição de protocolos-padrão internacionais.
- As fronteiras entre as camadas devem ser escolhidas de maneira a minimizar o fluxo de informações por meio das interfaces.
- O número de camadas deve ser elevado o suficiente para garantir o agrupamento de funções em uma mesma camada por necessidade e pequeno o bastante para que a arquitetura seja manejável.

Cada camada é usuária dos serviços prestados pela camada imediatamente inferior e presta serviços à camada imediatamente superior. Essa troca de informações entre as camadas adjacentes é chamada de troca de primitivas de serviços nas interfaces entre as camadas.

Apesar de o modelo OSI estar dividido em sete níveis, pode-se considerar genericamente que as três camadas mais baixas cuidam dos aspectos relativos à transmissão propriamente dita, a camada de transporte está relacionada com a comunicação fim a fim e as três camadas superiores tratam dos aspectos da aplicação, no nível do usuário.

A comunicação entre sistemas ocorre em camadas, ou seja, a camada de aplicação do sistema A se comunica com a camada de aplicação do sistema B e assim por diante até o nível físico, onde ocorre a comunicação física entre os sistemas.

O diagrama em blocos da figura 13.4 representa as camadas pertencentes ao modelo de referência OSI.

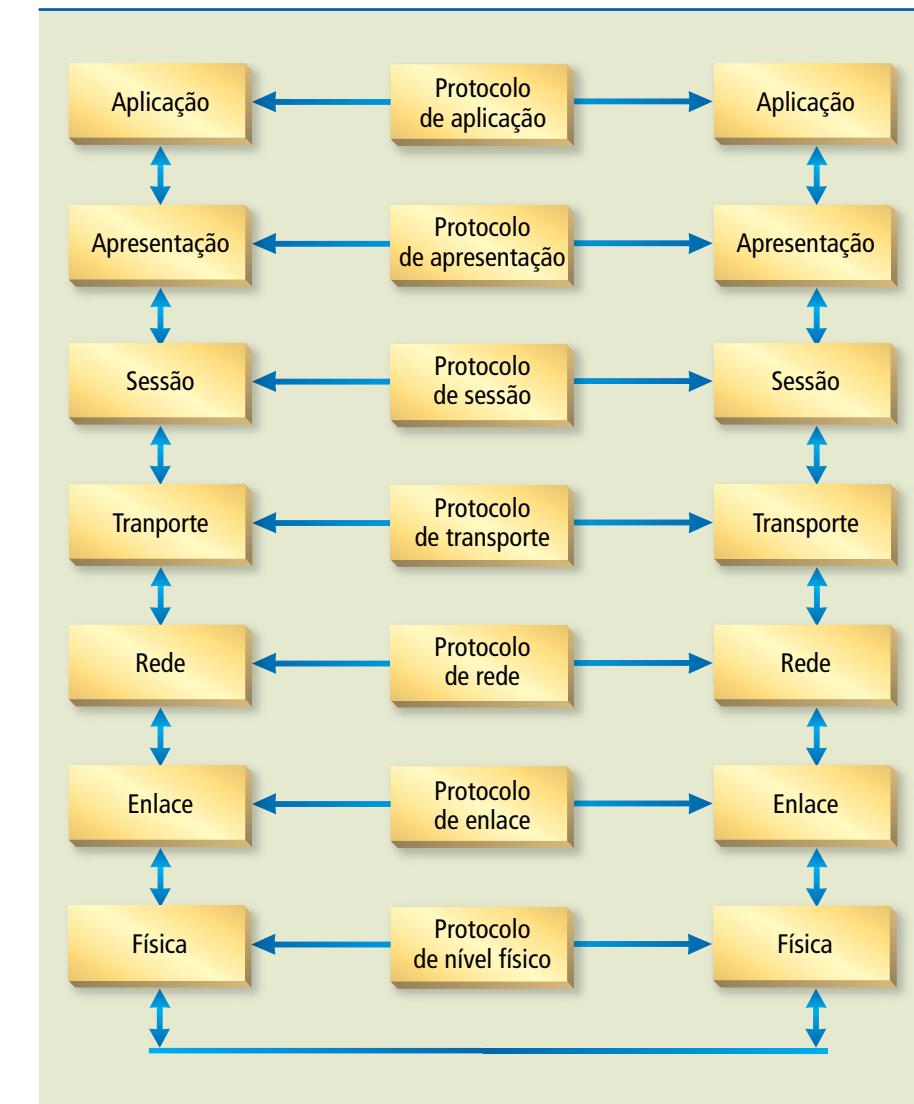


Figura 13.4
Modelo OSI.

As **primitivas de serviço** destinadas ao funcionamento do modelo OSI são:

- **Pedido (request)** – Para solicitar ou ativar determinado serviço.
- **Indicação (indication)** – Para informar a ocorrência de determinado evento.
- **Resposta (response)** – Para responder a determinado evento.
- **Confirmação (confirmation)** – Para confirmar a execução de um serviço solicitado.

Quem cuida dos detalhes dessa negociação é o protocolo. Por exemplo, caso duas propostas para o tamanho máximo das mensagens trocadas sejam conflitantes, o protocolo deve decidir qual das duas será aceita.

Os serviços podem ser de dois tipos: confirmado e não confirmado. No serviço confirmado, há um pedido, uma indicação, uma resposta e uma confirmação; no serviço não confirmado, apenas um pedido e uma indicação. O estabelecimento de uma conexão é um exemplo de serviço confirmado, e a desconexão, de serviço não confirmado.

As funções de cada camada pertencente ao modelo de referência OSI são:

- **Camada física (1)** – Trata dos aspectos relacionados com a transmissão transparente de bits pelo meio físico e dos padrões mecânicos, funcionais, elétricos e procedurais para acesso ao meio.
- **Camada de enlace (2)** – Proporciona a transferência confiável de unidades de informação (quadros) entre dois sistemas adjacentes, “escondendo” as características físicas do meio de transmissão.
- **Camada de rede (3)** – Controla a comutação e o estabelecimento da rota na criação de uma conexão, assim como a troca de informações entre os pontos comunicantes. Nessa camada, ocorre a adaptação entre diferentes tipos de redes, quando for o caso.
- **Camada de transporte (4)** – Assegura uma transmissão fim a fim confiável e, portanto, a integridade na transferência dos dados entre usuários finais, fornecendo às camadas superiores a necessária qualidade de serviço na troca de informações.
- **Camada de sessão (5)** – Oferece os meios necessários para organizar e sincronizar o diálogo entre dois processos de aplicação.
- **Camada de apresentação (6)** – Faz conversões de formatos ou códigos, preservando o conteúdo da informação enquanto resolve problemas de diferenças de sintaxe entre o sistema-fonte e o sistema-destino.
- **Camada de aplicação (7)** – Fornece os serviços diretamente aos processos de aplicação do usuário e atua como “janela” por onde as informações dos processos entram e saem do ambiente OSI.

13.9 Topologias de redes

Topologia é a configuração de interligação física dos equipamentos que compõem a rede (estações de trabalho e servidores), em que um conjunto de regras organiza a comunicação entre eles. Todas as topologias possuem como características básicas: altas taxas de transferência de dados; baixas taxas de erros de

transmissão; capacidade de enviar protocolos. Os fatores determinantes para a escolha da topologia a ser adotada são sua complexidade e os custos envolvidos de implementação do cabeamento.

Existem três topologias de redes fundamentais:

- Estrela (*star*).
- Anel (*ring*).
- Barra (*bus*).

Na **topologia em estrela**, todos os equipamentos da rede (estações de trabalho e servidores) estão ligados diretamente com um cabo a um dispositivo central (concentrador) do tipo ponto a ponto (figura 13.5). As vantagens dessa topologia são:

- Facilidade de isolar a fonte de uma falha de sistema ou equipamento, uma vez que cada estação está diretamente ligada ao concentrador.
- Facilidade de incluir nova estação na rede, bastando conectá-la ao concentrador.
- Direcionamento simples; apenas o concentrador possui essa atribuição.
- Baixo investimento em médio e longo prazos.

Entre as desvantagens destacam-se:

- Baixa confiabilidade: em uma rede sem redundância, caso ocorra falha no concentrador, todas as estações perderão comunicação com a rede.
- Todo o tráfego flui pelo concentrador, podendo ocorrer um ponto de congestionamento.

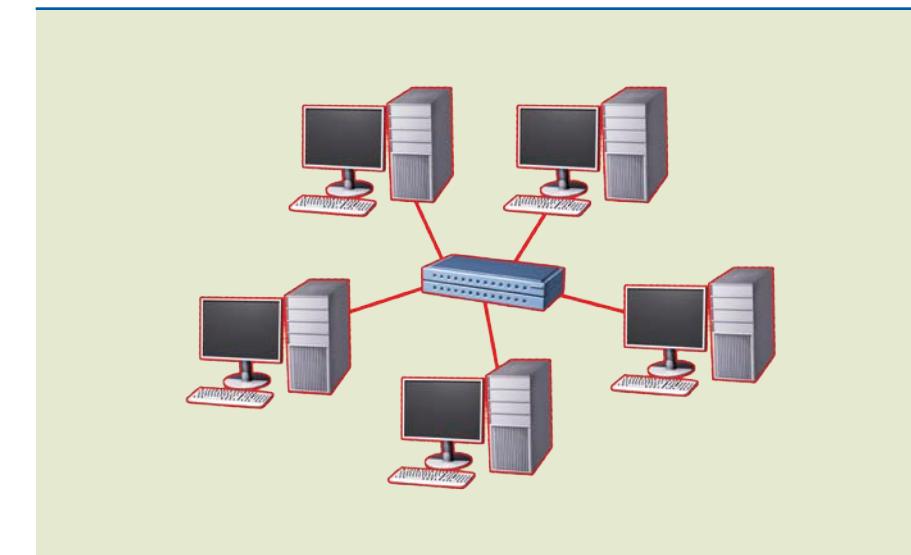


Figura 13.5
Topologia em estrela.

Na **topologia em anel**, todos os equipamentos da rede (estações de trabalho e servidores) estão conectados fisicamente a um único cabo, em formato de anel, no qual é necessária a junção de início e fim (figura 13.6). Nessa topologia, o tráfego das informações segue um único sentido pelo anel (unidirecional) e é

controlado por um sinal eletrônico denominado senha, recolhendo e entregando informações por meio do anel para as estações e/ou servidores. A rede Token Ring utiliza essa topologia, cujas vantagens são:

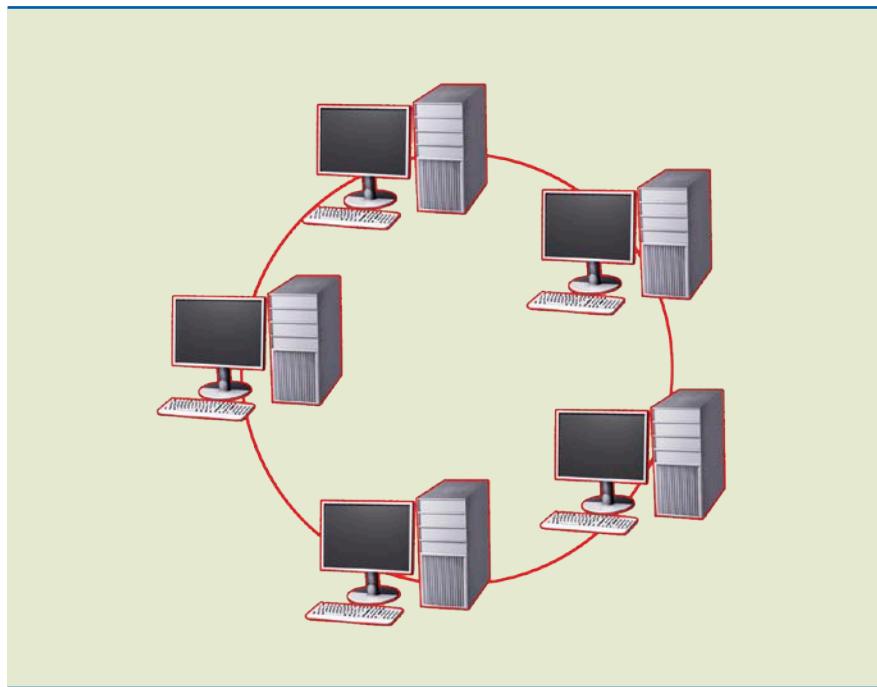
- Direcionamento simples.
- Possibilidade de possuir dois anéis funcionando ao mesmo tempo; assim, caso ocorra falha em um dos anéis, somente haverá queda do desempenho.

Entre as desvantagens destacam-se:

- Dificuldade de isolar a fonte de uma falha de sistema ou equipamento.
- Inclusão de novas estações e/ou servidores implica a paralisação da rede.

Figura 13.6

Topologia em anel.



Na **topologia em barramento ou barra**, todos os equipamentos da rede (estações de trabalho e servidores) estão interligados por um cabo central denominado barramento único. Nessa topologia, as informações caminham de modo bidirecional, eliminando decisões de roteamento (figura 13.7). Entretanto, o meio físico (barramento) é utilizado de maneira exclusiva pelas estações e/ou servidores quando estão transmitindo alguma informação. As vantagens dessa topologia são:

- Tráfego bidirecional.
- Baixo custo inicial.

Entre as desvantagens destacam-se:

- Dificuldade de isolar a fonte de uma falha de sistema ou equipamento.
- Inclusão de novas estações e/ou servidores implica a paralisação da rede.

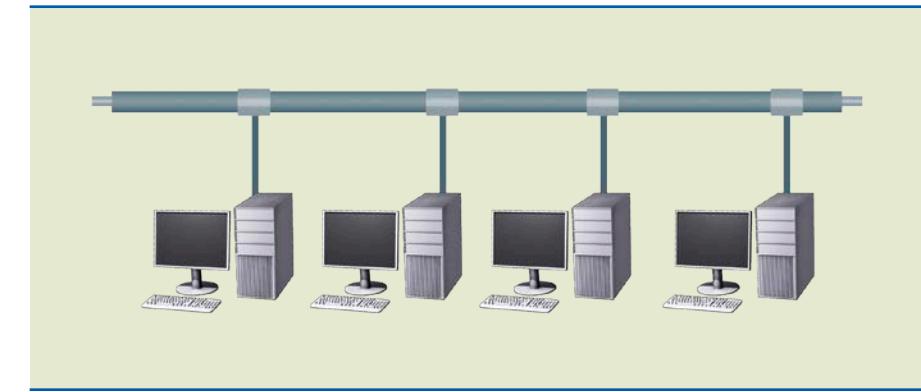


Figura 13.7

Topologia em barramento.

13.10 Análises de velocidade e topologia

Uma rede pode ter várias velocidades de transmissão, medidas em Mbps (megabits por segundo), de acordo com a topologia escolhida:

- **Topologia em barramento utilizando cabo coaxial** – Sua velocidade é limitada a 10 Mbps. O caminho do sinal elétrico nesse tipo de rede percorre obrigatoriamente a saída do primeiro computador para o terminador. Ao encontrar o terminador, o sinal elétrico é refletido de volta ao primeiro micro. Quando o usuário do segundo computador solicita um arquivo do terceiro micro, tem de aguardar que o sinal elétrico do cabo faça o caminho completo a cada informação recebida/transmitida. Outro problema é que, quando qualquer ponto do cabo (figura 13.8) apresenta mau contato, toda a rede fica desativada.



Figura 13.8

Cabo coaxial fino.

- **Topologia em estrela utilizando cabo UTP (par trançado)** – As velocidades podem variar de 10 a 100 Mbps. Nessa topologia, há alguns tipos de melhoria, em comparação com a anterior, por exemplo: quando o primeiro computador deseja comunicar-se com o segundo, os dados não precisam obrigatoriamente percorrer todo o cabo, e sim apenas o caminho mais curto entre eles. Quando ocorre o rompimento de algum ponto do cabo, somente a unidade envolvida é afetada, sem paralisação total da rede (figura 13.9).



- As velocidades da rede dependem do cabeamento (*hub* ou *switch*) ou da placa de rede instaladas em cada computador. As redes Microsoft, em geral, possuem a tecnologia Auto Sense, adaptando-se automaticamente a várias velocidades de transferência de dados.

Figura 13.9

Par trançado: (a) UTP e (b) STP.



13.11 Acessórios de hardware

O **networking interface card (NIC)**, conhecido por **placa de rede**, faz a comunicação dos computadores com os meios de transmissão (figura 13.10). A placa possui circuitos que convertem sinais para serem aplicados nos meios, podendo ser avulsa ou estar embutida na placa principal (placa-mãe) dos computadores *on-board*. Existem versões do tipo 10 Mbps e 100 Mbps.

Figura 13.10

Placa de rede ISA com todos os conectores.



O **transceiver** é um componente dos meios transmissores e receptores que converte sinais, podendo ser avulso ou estar embutido em algumas placas de rede. Por exemplo, para fazer ligações entre um cabo de fibra óptica em um cabo UTP (*unshielded twisted pair*), é necessário um *transceiver* para conversão dos sinais.

Os sinais tornam-se fracos se os meios físicos de transmissão forem muito longos. Para compensar tais limitações, utilizam-se **repetidores**. Esses equipamentos fa-

zem a ampliação dos sinais, porém também amplificam ruídos, não sendo conveniente usar vários repetidores em um mesmo segmento (figura 13.11).

Figura 13.11

Uso de um repetidor para aumentar a extensão da rede.



O **hub** é empregado para conectar vários cabos UTP entre si, ou seja, interconectar nós de determinada rede entre si.

O **multiplexador** combina várias informações em um único meio de transmissão, podendo ser usado para conexão de duas redes.

O **switch** é utilizado para conectar vários cabos UTP entre si, porém é possível fazer uma seleção lógica de melhores rotas de dados.

O **roteador (router)** permite a comunicação de redes, como no caso das redes MAN. É um acessório de *hardware* muito comum em redes corporativas.

A **ponte (bridge)** é um repetidor inteligente, pois controla o fluxo de dados. Ela analisa os pacotes recebidos e verifica qual o destino. Se o destino é o trecho atual da rede, ela não replica o pacote nos demais trechos, diminuindo a colisão e aumentando a segurança. Por analisar o pacote de dados, a ponte não consegue interligar segmentos de redes que utilizam protocolos diferentes.

13.12 Arquiteturas de rede

As principais arquiteturas de rede e suas características fundamentais são:

- Arc Net**

- Desenvolvida pela Data Point Corporation na década de 1970.
- Cada placa de rede tem um número (de 1 a 255).
- Oferece ampla faixa de opções de cabos (coaxial, UTP e fibra óptica). Se não fosse a rápida evolução da topologia Ethernet, certamente a Arc Net estaria presente no mercado.

- **Token Ring**

- Desenvolvida pela IBM em parceria com a Texas Instruments no final da década de 1970.
- Possui concentradores denominados MAU (*multistation access unit*) e suas interligações são feitas com cabos STP (*shielded twisted pair*) ou UTP.
- Funciona por passagem de senha e somente pode ser ligada em estrela, comportando-se como anel.

- **FDDI (Fiber Distributed Data Interface)**

- Desenvolvida pelo American National Standards Institute (ANSI) em 1987.
- Taxa de transmissão de 100 Mbps, alcançando até 200 km.

- **Ethernet**

- Desenvolvida pela Xerox na década de 1970; tornou-se padrão.
- Topologias em barra.
- Método de acesso CSMA/CD (*carrier sense multiple access/collision detection*).
- Velocidade de 10 Mbps.

- **Fast Ethernet**

- Também conhecida como 100 Base T, tornou-se padrão em junho de 1995; seu funcionamento é similar ao da Ethernet 10 Base T (CSMA/CD).
- Distância máxima entre concentrador e estações de 100 metros.

- **Padrão ATM (Asynchronous Transfer Mode)**

- Desenvolvida pela AT & T Bell Laboratories e pelo France Telecom's Research Center em meados da década de 1980.
- Pode ser utilizada como tecnologia de redes locais (LAN) e remotas (WAN) e permite a integração de dados.
- Difere das outras arquiteturas de altas velocidades por suportar diferentes velocidades na mesma rede. As velocidades de transferência de dados são de 25 Mbps, 100 Mbps, 155 Mbps e 625 Mbps; para o futuro próximo, serão de 1,2 Gbps e 2,4 Gbps.

13.13 Implementação da internet

A internet teve, originalmente, motivação militar e foi definida como rede datagrama por sua capacidade de rotear as comunicações em curso no caso de falha em algum de seus nós e/ou enlaces.

O modelo de referência OSI foi perdendo lugar para o TCP/IP (*transmission control protocol/internet protocol*), usado na internet. Essa arquitetura é uma al-

ternativa técnica ao modelo OSI quanto a viabilizar a implantação de uma solução aberta para redes de comunicação.

A arquitetura TCP/IP não nasceu com a internet. Enquanto a ARPANet teve seu início no final de 1969, a internet só se tornou TCP/IP em janeiro de 1983. Os principais motivos de crescimento da internet foram:

- No início da década 1970, foi utilizada como solução militar.
- Em 1986, passou a ser usada na educação.
- Em 1995, começou a ser empregada nas atividades comerciais.

TCP e IP são dois protocolos independentes; o IP é sempre usado nessa arquitetura, e o TCP nem sempre. TCP/IP não se refere a dois protocolos distintos, e sim à Arquitetura, que, além desses protocolos, possui vários outros (figura 13.12).

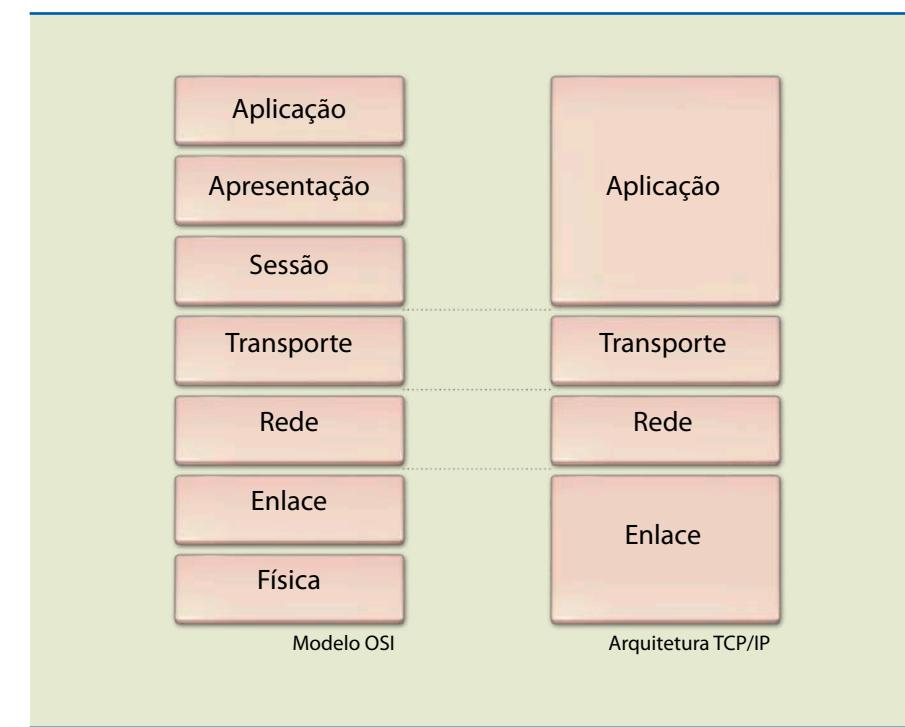


Figura 13.12
Modelos OSI e TCP/IP.

Entre as principais aplicações da internet destacam-se:

- Aplicações clássicas: transferência de arquivos; correios eletrônicos.
- Aplicações www: buscadores (*browsers*) de endereços; transmissões de dados, voz, imagem, vídeo etc.; novidades no futuro próximo (multisserviço).

13.13.1 Arquitetura TCP/IP

A arquitetura TCP/IP, utilizada na internet, prevê apenas um protocolo de rede, o IP, o qual é sempre não orientado à conexão e cuja versão atualmente em uso é a 4. Os endereços IP_{v4} têm quatro octetos, dividindo-se em cinco classes (A, B, C, D e E) e três tipos (*unicast, multicast e broadcast*).

O crescimento vertiginoso da internet trouxe como ameaça o possível esgotamento dos endereços IP_{v4}, o que implicaria o impedimento do crescimento da rede. Um dos artifícios usados para ampliar a utilização do IP_{v4} foi a criação das máscaras de subrede, que permitem, com um único endereço IP_{v4} válido, endereçar computadores em diferentes subredes.

Como os computadores somente entendem endereços numéricos e para as pessoas o mais natural é a memorização de nomes, torna-se necessária uma base de dados distribuída, o chamado DNS, que faça a conversão de nomes em endereços. Quando se conecta um computador a uma rede TCP/IP usando endereço IP_{v4} fixo, é preciso configurar manualmente quatro informações nesse computador:

1. Seu endereço IP_{v4}.
2. Sua máscara de subrede.
3. Endereço IP_{v4} de seu *default gateway*.
4. Endereços IP_{v4} dos servidores de DNS.

Como dito, os endereços IP_{v4} podem ser de três tipos:

- **Unicast** – Identifica um computador individualmente na rede.
- **Multicast** – Identifica os grupos fechados de computadores em uma rede.
- **Broadcast** – É o endereço destinado a todos os computadores de uma rede.

Cada interface de um computador em uma rede TCP/IP:

- Só pode possuir um endereço IP *unicast*.
- Pode estar registrada em nenhum, um ou vários grupos *multicast*.
- Deve ler todas as mensagens *broadcast*.

Os endereços IP_{v4}, como definidos pela **RFC** 791, subdividem-se em três partes:

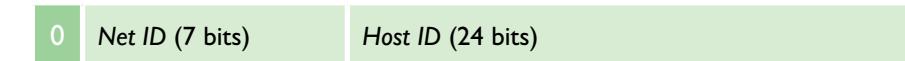
- A primeira identifica a classe de endereçamento ao qual o endereço pertence.
- A segunda identifica cada diferente rede dentro da internet (*net ID*).
- A terceira identifica cada diferente computador dentro dessa rede (*host ID*).
- Cada uma das cinco classes dos endereços IP_{v4} possui uma faixa de endereçamento, como mostra a tabela 13.1.

Tabela 13.1
Faixas de endereçamento
dos endereços IP_{v4}.

Classe	Faixa de endereçamento
A	de 0.0.0.0 a 127.255.255.255
B	de 128.0.0.0 a 191.255.255.255
C	de 192.0.0.0 a 223.255.255.255
D	de 224.0.0.0 a 239.255.255.255
E	de 240.0.0.0 a 247.255.255.255

RFC, sigla inglesa para Request for Comments, documentos que propõem padrões usados na internet.

Classe A:



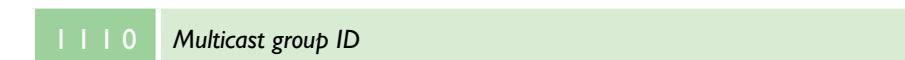
Classe B:



Classe C:



Classe D:



Classe E:



Conforme a RFC 917, existe a possibilidade de subdividir os bits originalmente usados para identificar os computadores (*host ID*) em duas partes:

- Uma para identificar subredes dentro de uma rede (*subnet ID*).
- Outra para identificar cada diferente computador dentro de uma subrede (*host ID*).

As razões para que as organizações estruturem suas redes corporativas em subredes são de várias naturezas:

- Segmentação de instalações físicas.
- Segmentação de comportamentos de tráfego (evitando que os usuários mais frequentes impeçam os demais de terem um bom serviço).
- Limitações técnicas nos diferentes segmentos (distâncias máximas, número de estações etc.).
- Diversas tecnologias de redes locais.

Há ainda a vantagem da necessidade de tabelas de roteamento menores, pois, na maioria dos casos, com um nível hierárquico de endereçamento a mais, cada roteador identifica individualmente um número de máquinas menor.

Exemplo

Vamos dividir uma rede em duas subredes, por meio de máscaras de subrede, aproveitando um mesmo endereço classe C.



1. Vemos que 200.0.0.0 é um endereço IP classe C válido. (É importante notar que não é recomendado que se utilizem máscaras com todos os bits 0 ou todos os bits 1.)

Endereço IP _{v4} classe C em decimal (para 252 máquinas)	200	0	0	0
Endereço classe C em binário	11001000	00000000	00000000	00000000
Significado dos bits	Classe	Net ID		Host ID

2. Se essa rede classe C não for dividida em subredes, sua máscara de subrede será:

Máscara de subrede em binário	1111111	1111111	1111111	00000000
Máscara de subrede em decimal	255	255	255	0

3. Dividindo essa rede classe C em duas redes com 126 diferentes máquinas, cada uma passa a ter:

Endereço IP _{v4} da primeira subrede em decimal (126 máquinas)	200	0	0	0
Endereço IP _{v4} da primeira subrede em binário (126 máquinas)	11001000	00000000	00000000	00000000
Significado dos bits	Classe	Net ID		S Host ID
Máscara de subrede em binário	1111111	1111111	1111111	10000000
Máscara de subrede em decimal	255	255	255	128
Endereço IP _{v4} da segunda subrede em decimal (126 máquinas)	200	0	0	128
Endereço IP _{v4} da segunda subrede em binário (126 máquinas)	11001000	00000000	00000000	10000000
Significado dos bits	Classe	Net ID		S Host ID
Máscara de subrede em binário	1111111	1111111	1111111	10000000
Máscara de subrede em decimal	255	255	255	128

13.14 Tradução de nomes em endereços IP

Os computadores, para tomarem decisão de roteamento com base no IP_{v4}, precisam extraírem dos cabeçalhos dos pacotes a informação numérica de seus endereços. Essa é sua linguagem “natural”. No entanto, não é nada natural guardarmos endereços numéricos, por exemplo: qual o endereço IP_{v4} para visitar o *site* da Anatel?

Para os usuários, o mais natural são os nomes (www.anatel.gov.br), porém qual é o endereço IP_{v4} correspondente a eles? No caso da Anatel, é 200.252.158.235, mas quem seria capaz de memorizar esse e tantos endereços de *sites*?

A lei de formação dos nomes na internet é totalmente semelhante à lei de formação dos números telefônicos. A tabela 13.2 apresenta alguns exemplos.

Tipos de acesso	Códigos de acesso						
	etegv	@	etegv	.	com	.	br
Endereço de correio eletrônico (e-mail)							
Número telefônico internacional (em ordem invertida do habitual)	2500	-	6166	-	11	-	55

Ambos são universais, unívocos e hierárquicos.

13.15 Cabeamento estruturado

O cabeamento estruturado utilizando cabo do tipo par trançado UTP (não blindado) é composto por vários fios trançados entre pares e entre fios, sem blindagem, pois o “trançado” serve justamente para garantir a imunidade a ruídos externos e internos ao cabo.

Atualmente, os mais usados possuem oito fios (quatro pares) e, como conector, é empregado o modelo conhecido como RJ-45. A norma internacional que regulamenta a conexão do cabeamento estruturado é a EIA/TIA 568, a qual é subdividida em T568A e T568B, conforme mostra a tabela 13.3.

RJ-45 – EIA/TIA T568A		RJ-45 – EIA/TIA T568B	
Pino 1	Branco do verde	Pino 1	Branco do laranja
Pino 2	Verde	Pino 2	Laranja
Pino 3	Branco do laranja	Pino 3	Branco do verde
Pino 4	Azul	Pino 4	Azul
Pino 5	Branco do azul	Pino 5	Branco do azul

Tabela 13.2

Exemplos de nomes na internet.

Tabela 13.3

Conexão do cabeamento estruturado.



RJ-45 – EIA/TIA T568A		RJ-45 – EIA/TIA T568B	
Pino 6	Laranja	Pino 6	Verde
Pino 7	Branco do marrom	Pino 7	Branco do marrom
Pino 8	Marrom	Pino 8	Marrom

A categoria mais comum atualmente é a 5e, resultado de algumas melhorias da categoria 5. Os cabos categoria 3 representam etapas mais antigas, indicando materiais em desuso ou com baixa *performance*. Existe também a categoria 6, que, porém, não é ainda a mais utilizada.

É importante lembrar que, quando usamos determinada categoria de cabo, devemos empregar a mesma categoria para todos os acessórios. Não podemos utilizar, por exemplo, um cabo categoria 6 com um conector categoria 5e.

O custo do cabo é relativamente baixo, o que o torna um meio de transmissão bastante usado. Além disso, há certa facilidade de instalação, pois as ferramentas não são muito caras, como ocorre com as fibras ópticas. Os cabos teoricamente suportam velocidades de transferência de dados de até 100 Mbps, em distâncias de até 100 metros, porém recomenda-se nunca trabalhar com valores-limite, pois, dependendo do ambiente, os cabos podem sofrer interferências externas.

O cabo STP (*shielded twisted pair*), que é o cabo de pares trançados blindado, é muito semelhante ao citado anteriormente, mas o custo é mais alto, devido à blindagem, razão pela qual não é muito utilizado. A blindagem tem a função de diminuir (ou atenuar) as interferências eletromagnéticas.

13.15.1 Limites de distância

A norma EIA/TIA padrão 568 estabelece as distâncias máxima e mínima entre os dispositivos conectados à rede, para cabos UTP/STP.

Distância máxima de 100 metros entre:

- Estação de trabalho e *hub*.
- Estação de trabalho e estação de trabalho.
- *Hub* e *hub*.

Distância mínima de 0,5 metro entre:

- Estação de trabalho e estação de trabalho.
- Estação de trabalho e *hub*.

Outro dado importante é que a rede não pode conter mais do que cinco segmentos.

As categorias de cabos e suas respectivas velocidades de transferência são apresentadas na tabela 13.4.

Categoria do cabeamento	Velocidade de transferência
Categoria 3	10 Mbps
Categoria 4	16 Mbps
Categoria 5	100 Mbps
Categoria 5e	155 Mbps
Categoria 6	1 000 Mbps (1 Gbps)

Tabela 13.4

Categoria dos cabos e velocidade de transferência.

Em ligações ponto a ponto sem utilização de *hub*, a conexão é do tipo *crossover*, ou seja, uma das extremidades do cabo de rede deve ser configurada conforme o padrão T568A, e a outra extremidade, conforme o padrão T568B. Já em conexões ponto a ponto com utilização de *hub*, as duas extremidades do cabo de rede podem ser configuradas conforme o padrão T568A ou o padrão T568B.

A tabela 13.5 mostra as cores dos pares em relação ao número.

Número do par	Cor do par
Par 1	Azul
Par 2	Laranja
Par 3	Verde
Par 4	Marrom

Tabela 13.5

Cores dos pares em relação ao número.



Figura 13.13
Conector RJ-45.

GEORGIOS ALEXANDRIS/SHUTTERSTOCK

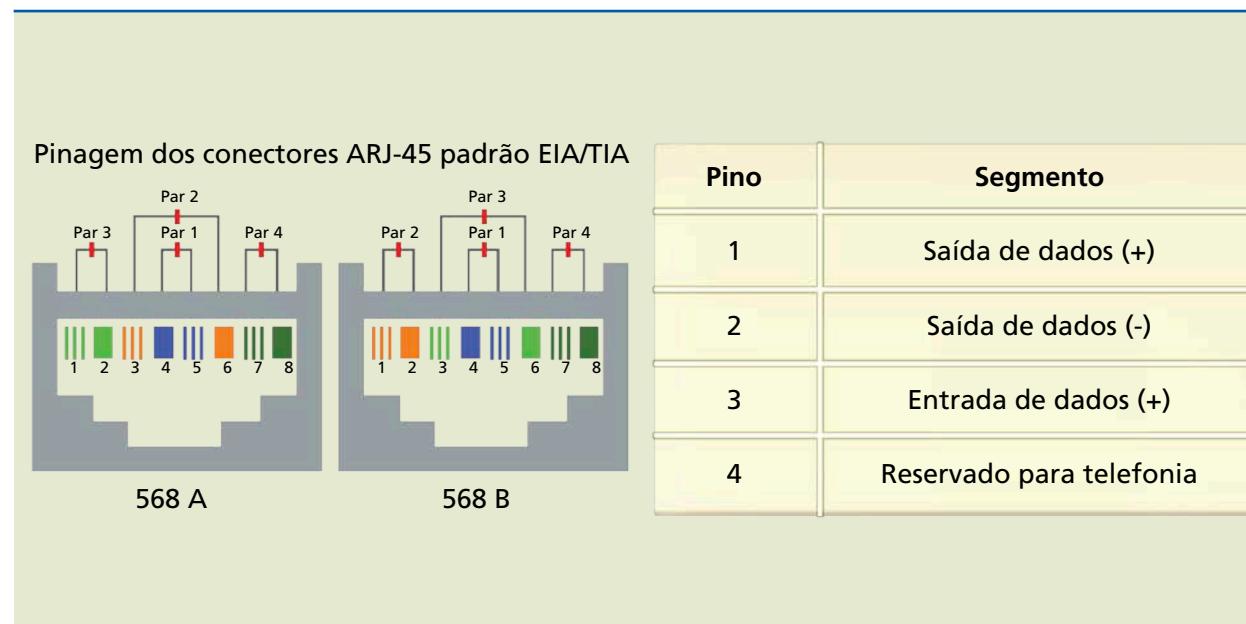


Figura 13.14
Ordem dos cabos no conector RJ-45.

13.15.2 Preparação do cabo

Para preparar o cabo em si, além de conectores RJ-45, é necessário um alicate para *crimp* (figura 13.15). Da mesma forma que os conectores BNC usados no cabo coaxial, os fios do cabo par trançado são presos ao conector RJ-45 por pressão. Basta alinhar os fios do pino 1 ao pino 8 do conector de acordo com o padrão a ser utilizado (T568A ou T568B) e pressionar o conector com o alicate. Não é preciso desencapar os fios, pois o próprio conector RJ-45 possui pinos em forma de lâmina, desencapando automaticamente os fios durante a montagem do cabo.

Figura 13.15
Alicate para *crimp* de conectores RJ-45.



DENIROFOTO / SHUTTERSTOCK

13.15.3 Instalação do cabo

O projeto mostrando a trajetória dos cabos no ambiente em que a rede está sendo implementada é muito importante. A melhor maneira de instalar cabos é criando pontos de rede fixos, por meio de caixas conectadoras aprovadas para trabalhar com categoria 5. Os micros são conectados a essas caixas por um cabo de menor comprimento, enquanto as caixas são interligadas a outras caixas conectadoras perto do concentrador (*hub* ou *switch*). Esse procedimento facilita não apenas a instalação das estações da rede, mas também a manutenção. Como na maioria das vezes os problemas de cabo partido ocorrem próximo da estação de trabalho, basta substituir um pequeno segmento do cabo.

A figura 13.16 mostra modelos de caixas conectadoras internas, a serem embutidas na parede, como externas.



SMART7 / SHUTTERSTOCK



DIGI / SHUTTERSTOCK

13.15.4 Patch panels

Em redes de grande porte, os cabos UTP/STP provenientes dos diversos pontos de rede (caixas conectadoras junto aos micros) são conectados a blocos de distribuição, fixos em estruturas metálicas. Esses conjuntos são denominados **patch panels**. A ligação dos blocos de distribuição aos *hubs* e/ou *switches* ocorre por meio de **patch cords**. A utilização de *patch panels* oferece melhor organização e maior flexibilidade, facilitando, consequentemente, a manutenção.

Referências bibliográficas



GOMES, Alcides Tadeu. *Telecomunicações: transmissão e recepção*. São Paulo: Erica. 1995.

MIYOSHI, Edson Mitsugo; SANCHES, Carlos Alberto. *Projetos de sistemas rádio*. 1^a ed. São Paulo: Erica. 2002.

MORAES, Alexandre Fernandes de. *Redes de Computadores: fundamentos*. 1^a ed. São Paulo: Erica. 2004.

RIBEIRO, Justino José Antônio. *Comunicações ópticas*. 4^a ed. São Paulo: Érica. 2011.

SAMPAIO, Marcelo Alencar de; QUEIROZ, Wamberto José Lira de. *Ondas eletromagnéticas e teoria de antenas*. 1^a ed. São Paulo: Erica. 2010.

SOARES NETO, Vicente. *Telecomunicações: sistemas de modulação*. 1^a ed. São Paulo: Erica 2005.

SVERZUT, José Umberto. *Redes GSM, GPRS, EDGE e UMTS: evolução a caminho da quarta geração (4G)*. 2^a ed. São Paulo: Érica. 2007.

CENTRO PAULA SOUZA DO GOVERNO DE SÃO PAULO





Excelência no ensino profissional

Administrador da maior rede estadual de educação profissional do país, o Centro Paula Souza tem papel de destaque entre as estratégias do Governo de São Paulo para promover o desenvolvimento econômico e a inclusão social no Estado, na medida em que capta as demandas das diferentes regiões paulistas. Suas Escolas Técnicas (Etecs) e Faculdades de Tecnologia (Fatecs) formam profissionais capacitados para atuar na gestão ou na linha de frente de operações nos diversos segmentos da economia.

Um indicador dessa competência é o índice de inserção dos profissionais no mercado de trabalho. Oito entre dez alunos formados pelas Etecs e Fatecs estão empregados um ano após concluírem o curso. Além da excelência, a instituição mantém o compromisso permanente de democratizar a educação gratuita e de qualidade. O Sistema de Pontuação Acrescida beneficia candidatos afrodescendentes e oriundos da Rede Pública. Mais de 70% dos aprovados nos processos seletivos das Etecs e Fatecs vêm do ensino público.

O Centro Paula Souza atua também na qualificação e requalificação de trabalhadores, por meio do Programa de Formação Inicial e Educação Continuada. E ainda oferece o Programa de Mestrado em Tecnologia, recomendado pela Capes e reconhecido pelo MEC, que tem como área de concentração a inovação tecnológica e o desenvolvimento sustentável.