

João Baptista Bayão Ribeiro

# **TELECOMUNICAÇÕES**

## **1º Volume**

1ª Edição

Rio de Janeiro

J. B. Bayão

2013

## Curriculum do Autor

João Baptista Bayão Ribeiro é formado em Engenharia de Telecomunicações pela UFF (Universidade Federal Fluminense) em 1971. Trabalhou na Philips do Brasil como Engenheiro Instalador, na Divisão de Equipamentos Científicos e Industriais e simultaneamente como professor da UFF em tempo parcial. Depois ingressou no Laboratório de Desenvolvimento da antiga Telerj, onde trabalhou em Normas Técnicas de Operação e de Manutenção de Sistemas e Homologação de Equipamentos. É pós-graduado em Engenharia Elétrica pelo COPPE-UFRJ, onde obteve o título de MsC em 1979. Na década de 80 trabalhou no CpqD em Campinas, na especificação do projeto Trópico, como Engenheiro da Telecom, de S. Paulo. De volta à Telerj, trabalhou no Planejamento de Redes Telefônicas e de Dados. Fez inúmeros trabalhos para a antiga Telebrás, tendo participado ativamente do processo de digitalização do Sistema Telefônico no Brasil. Participou de vários Congressos e foi Professor em várias turmas de técnicos e Engenheiros no Centro Nacional de Treinamento da Telebrás, em Brasília. Aposentou-se como professor em DE pela Escola de Engenharia da UFF, onde lecionou por vários anos após a privatização do Sistema Telebrás e extinção da antiga Telerj. Foi também Professor Substituto no IME, e Professor do curso à distância “Tecnologias Modernas de Telecomunicações”, promovido pelo Centro de Estudos de Pessoal do Exército Brasileiro em convênio com a UFF.

## Sumário

Este Volume 1 visa apresentar ao estudante técnico de Telecomunicações, alguns aspectos relativos a Sistemas de Telecomunicações.

Sua linguagem é acessível também a qualquer pessoa interessada, mesmo que não tenha formação especializada em Telecomunicações.

Como esse livro tem caráter inicial, a abordagem adotada será bastante intuitiva, utilizando-se para explicação dos assuntos uma linguagem simples e direta, com o mínimo de matemática aplicada. Não serão considerados aspectos de topologia de redes, apenas aqueles tópicos básicos aplicáveis a qualquer sistema de Telecomunicações.

## Palavras Chave

Modulação, sistema, sinal, telecomunicação, digital, analógico, conversão, senoidal, relação S/N, banda, AM, FM, PM, banda básica, frequência, sistema ruído, distorção.

## Direitos Autorais

Este documento é protegido por Copyright © 2010 por seu autor listado abaixo. Você pode distribuir e/ou modificar este trabalho, tanto sob os termos da Licença Pública Geral GNU (<http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>), versão 3 ou posterior, ou da Licença de Atribuição Creative Commons (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>), versão 3.0 ou posterior.

Autor: João Baptista Bayão Ribeiro

Feedback: [jribeiro@telecom.uff.br](mailto:jribeiro@telecom.uff.br)



## Índice

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| Introdução.....                                      | 6  |
| Exemplo de um Sistema de Comunicação.....            | 8  |
| Formas de Conectividade.....                         | 10 |
| Diagrama em Blocos de um Sistema de Transmissão..... | 12 |
| Multiplexação.....                                   | 13 |
| Múltiplo Acesso.....                                 | 14 |
| Fluxo da Informação no Múltiplo Acesso.....          | 16 |
| Formas Básicas de Múltiplo Acesso.....               | 18 |
| Tipo de Informação.....                              | 19 |
| Comutação de Circuitos.....                          | 21 |
| Comutação de Pacotes.....                            | 24 |
| Sinal Analógico.....                                 | 24 |
| Sinal Digital.....                                   | 25 |
| Sistema Analógico .....                              | 27 |
| Sistema Digital.....                                 | 28 |
| Conversor A/D e Conversor D/A.....                   | 29 |
| Conversão A/D e D/A tipo PCM.....                    | 30 |
| Amostragem ou Tomada de Amostras.....                | 31 |
| Quantização .....                                    | 32 |
| Codificação .....                                    | 33 |
| Conversão D/A .....                                  | 35 |
| Decodificação .....                                  | 35 |
| Reconstituição do sinal analógico .....              | 36 |
| Ruído de quantização.....                            | 37 |
| Transmissão Digital.....                             | 37 |
| Sinais Senoidais.....                                | 40 |
| Espectro de Frequências de um Sinal.....             | 42 |
| Largura de Banda.....                                | 43 |
| Relação Sinal/Ruído (S/N).....                       | 44 |
| Relação S/N Versus B.....                            | 45 |
| Sinal de Banda Básica.....                           | 48 |
| Modulação.....                                       | 49 |
| Modulação Analógica versus Modulação Digital.....    | 51 |
| Características Gerais da Modulação.....             | 54 |
| Um Pouco de História.....                            | 55 |

## Introdução

Um sistema de telecomunicações seja ele qual for, é composto de um conjunto de equipamentos, o qual tem como objetivo a transmissão de informação entre pontos geograficamente distintos, chamados de fonte e destino, com uma garantia de qualidade.

A informação pode ser entendida como uma mensagem gerada pela fonte, podendo ser constituída por sons, imagens, ou mesmo símbolos como caracteres gráficos.

Os equipamentos interligados adequadamente garantem o transporte e entrega da informação no destino com a qualidade necessária. Eles são agrupados em pontos ao longo do caminho entre fonte e destino, chamados de nós da rede, rede esta que possibilita a conexão de várias fontes e destinos distribuídos geograficamente.

Os nós são interligados por sistemas de transmissão de sinais, os quais representam a informação a ser transmitida.

A Figura 1-1 apresenta de forma esquemática o sistema de telecomunicações interligando fonte e destino, através de 3 redes, passando por dois nós em cada rede, interligados por sistemas de transmissão.

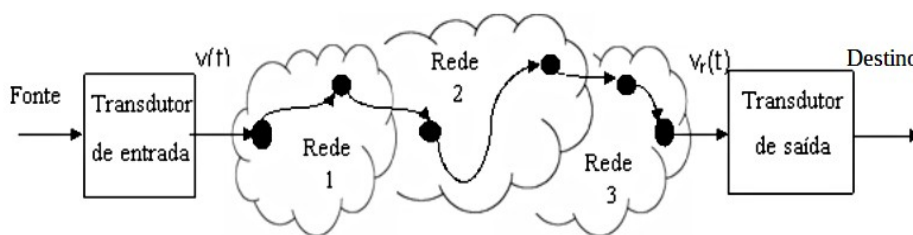


Figura 1-1

No estado atual da tecnologia, a informação de som, imagem ou caracteres gráficos é convertida em um sinal elétrico,  $v(t)$ , pelo transdutor de entrada, como etapa inicial para transmissão.

Este sinal elétrico constitui uma representação da mensagem a ser transmitida pelo sistema até o destino com uma qualidade adequada, de modo que o sinal elétrico recebido,  $v_r(t)$ , possa ser utilizado pelo transdutor de saída para gerar a informação desejada.

É importante lembrar que mesmo sendo a mensagem gerada e/ou recebida por

máquinas, a informação acaba sendo entregue ao homem de forma audível e/ou visual em monitor ou relatório impresso. O sistema, portanto, existe para atender as necessidades humanas de comunicação e a qualidade necessária será sempre definida pelo homem.

Segundo a Wikipedia (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Telecomunicação>), "Comunicação é o processo pelo qual uma informação gerada em um ponto no espaço e no tempo chamado fonte é transferida a outro ponto no espaço e no tempo chamado destino."

Ainda segundo Wikipedia (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema>), "um sistema (do grego sistemion), é um conjunto de elementos interconectados, de modo a formar um todo organizado. É uma definição que acontece em várias disciplinas, como biologia, medicina, informática, administração. Vindo do grego o termo "sistema" significa "combinar", "ajustar", "formar um conjunto".

Portanto, Sistemas de Comunicações é um conjunto de elementos interconectados e ajustados, ou combinados, para transferir informação gerada em um ponto do espaço chamado fonte a outro ponto do espaço chamado destino.

A fonte e o destino podem estar geograficamente separados, por distâncias desde alguns metros a milhares de quilômetros. A comunicação entre eles, cuja finalidade é a transferência de informação, atualmente é feita utilizando processos eletromagnéticos, constituindo a Telecomunicação, ou comunicação à distância.

## Exemplo de um Sistema de Comunicação

A Figura 1-2 apresenta como exemplo um diagrama simplificado de um sistema de comunicação, mostrando uma fonte analógica de sinal de voz sendo transmitida via canal rádio.

A informação gerada pela fonte (que no caso é uma pessoa, o locutor), após ser transformada em um sinal elétrico pelo Transdutor de entrada, é enviada pelo Transmissor ao Receptor através do Canal ou Meio de Transmissão, vencendo a distância geográfica que os separa.

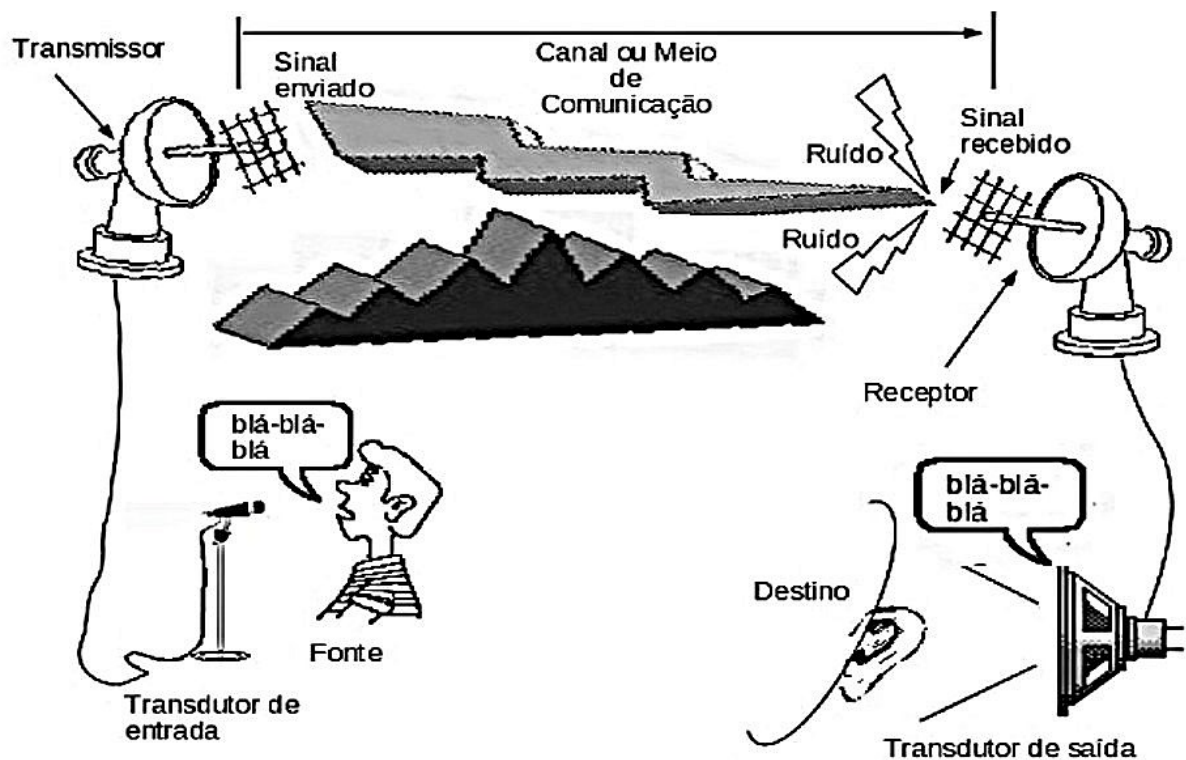


Figura 1-2

Neste sistema, que é muito simples, não foi necessário o uso de nós para a constituição de redes. Para os sistemas atuais, os nós são empregados na rede, tendo funções de comutação encaminhamento e armazenamento da informação.

É claro que o sistema mostrado na Figura 1-2, para ter utilidade prática, deveria

ser duplicado permitindo a comunicação também no sentido oposto ao mostrado na Figura 1-2.

Normalmente, os enlaces de transmissão permitem em fluxo bi-direcional de informação, de forma que a comunicação se processe em ambos os sentido de transmissão, de A para B e de B para A.

Os sistema de transmissão, ou enlace de transmissão, ou simplesmente enlaces, podem ser classificados conforme sua forma de conectividade.

## Formas de Conectividade

A comunicação pode ser classificada quanto a sua forma de conectividade, isto é, a maneira como o fluxo das informações foi através da rede. Apesar de mostrarmos, figurativamente, as formas de conectividade para um enlace, este conceito estende-se a toda a rede, podendo ou não incluir nós de uma conexão. Observe que este conceito é abrangente, sendo válido quaisquer sejam o tipo de informação transmitida ou a tecnologia empregada. As formas de conectividade são:

1- Simplex, ou seja, um enlace unidirecional. Conforme ilustra a Figura 1-3 a conexão simplex é unidirecional, em que as transmissões são feitas do terminal A para o terminal B, nunca na direção oposta.

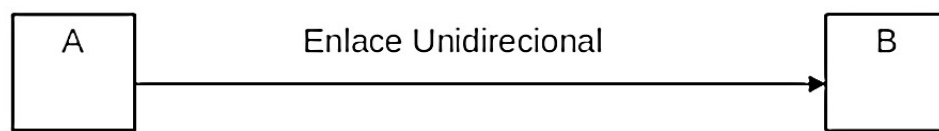


Figura 1-3

2- Half-Duplex, conforme ilustrado na Figura 1-4, a transmissão pode ser feita tanto de A para B quanto de B para A, mas nunca simultaneamente.

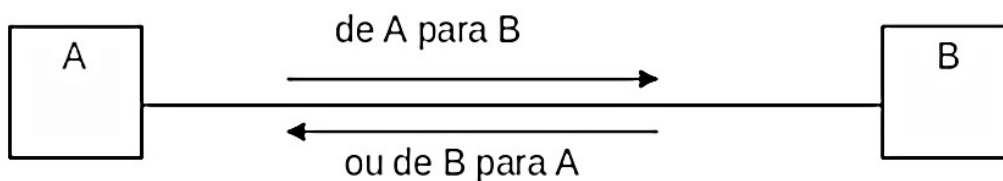


Figura 1-4

3- Full-duplex, conforme ilustrado na Figura 1-5, o enlace é constituído por uma conexão de duplo sentido, onde a transmissão acontece em ambas as direções simultaneamente.

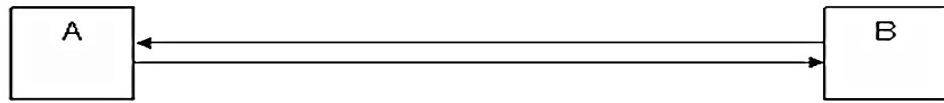


Figura 1-5

Por exemplo, a transmissão de uma rádio FM, feita em broadcasting (isto significa um só transmissor para vários receptores) é uma transmissão simplex, no sentido do transmissor para os receptores.

Um sistema de comunicações do tipo PX tem conectividade half-duplex, utilizando a palavra marcadora “câmbio” para sinalizar a inversão do sentido de transmissão.

A transmissão em telefonia utiliza conectividade full-duplex. Ambos os terminais envolvidos numa conexão podem transmitir e receber a qualquer instante.

## Diagrama em Blocos de um Sistema de Transmissão

Para efeito didático, será adotado o diagrama da Figura 1-6.

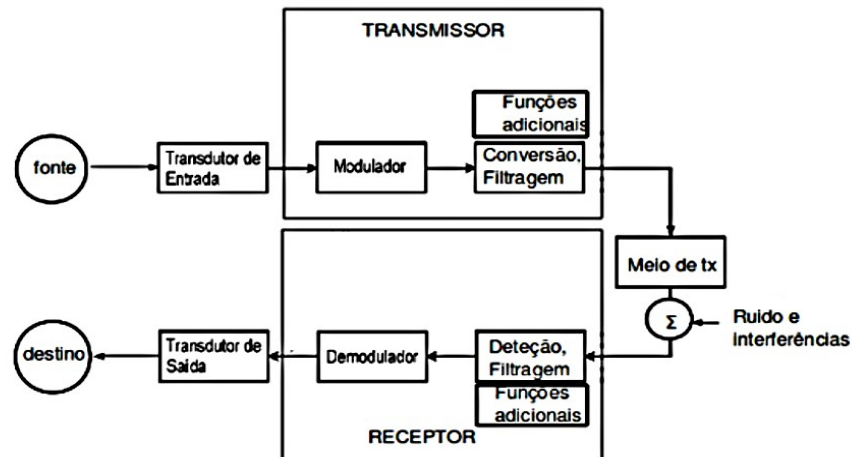


Figura 1-6

Em geral, um sistema de transmissão visa o atendimento a diversos usuários simultaneamente. Para cada par de usuários (fonte-destino), tudo deve ocorrer como se a comunicação fosse exclusiva para aquele par, independente de existirem outros usuários se comunicando através do sistema. Dependendo da estrutura do sistema isto se reflete em arquiteturas de multiplexação, múltiplo acesso, etc (representadas na Figura 1-6 pelo bloco “Funções Adicionais”).

## Multiplexação

Segundo definição da Wikipédia (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Multiplexador>) “Um multiplexador. multiplexer, mux ou multiplex é um dispositivo que codifica as informações de duas ou mais fontes de dados num único canal. São utilizados em situações onde o custo de implementação de canais separados para cada fonte de dados é maior que o custo e a inconveniência de utilizar as funções de multiplexação/demultiplexação.”

Em eletrônica, o multiplexer combina um conjunto de sinais eléctricos num único sinal. Existem diferentes tipos de multiplexers para sistemas analógicos e digitais (mais adiante, no texto, serão conceituados sistemas analógicos e digitais).

A Figura 1-7 apresenta uma ilustração da função Multiplex.

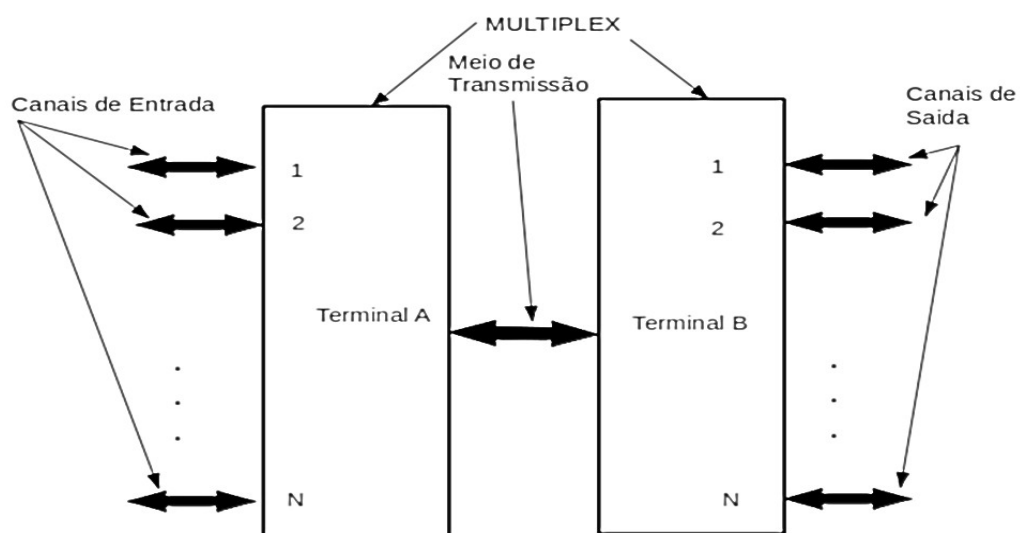


Figura 1-7

Nesta Figura, subentende-se que cada canal do Multiplex é bi-direcional, isto é, é duplex.

Assim, cada equipamento digital fornece para cada canal de entrada ou de saída circuitos de transmissão e recepção.

Conforme se vê da Figura 1-7, a função Multiplex permite que diversos canais de transmissão partilhem o mesmo meio de transmissão, sem que um interfira no outro.

## Múltiplo Acesso

Devemos lembrar que um sistema de comunicações é na realidade composto de um conjunto de Recursos de Comunicações (RC), os quais devem ser utilizados da forma mais eficiente possível de modo a servir a um conjunto de usuários que desejam se comunicar com uma qualidade especificada a um custo adequado.

De um modo geral, um sistema de comunicações é um sistema multiusuário.

Podemos imaginar um sistema multiusuário como um sistema onde um conjunto finito de RC é disputado por um conjunto também finito de usuários. Quanto maior for o conjunto de usuários em relação ao conjunto de RC disponíveis, maior o impacto negativo na qualidade final do serviço prestado.

Conclui-se, portanto, que é muito importante a forma como os RC são alocados aos usuários, pois isto definirá a eficiência do sistema.

Uma forma muito comum de alocação de RC é o compartilhamento de um meio de transmissão por vários usuários através de técnicas de multiplexação. Outra abordagem envolve o conceito de Múltiplo Acesso.

Na Multiplexação, os requisitos de usuários ou planejamento de alocação de RC são fixos, ou no máximo, variam lentamente. A alocação dos RC é estabelecida a priori, e o compartilhamento é usualmente um processo que se realiza confinado a um local (p. ex., uma placa de circuito).

Múltiplo Acesso, entretanto, usualmente envolve o compartilhamento remoto de um recurso (por exemplo, um satélite), de uma forma dinâmica.

O Múltiplo Acesso, como o próprio nome diz, refere-se sempre a uma parte do Sistema de Comunicações onde existe a figura do usuário o qual disputa recursos de comunicação (RC) entre diversos outros usuários do Sistema com a finalidade de obtenção de acesso ao Sistema e assim poder enviar e receber informação, através do Sistema.

Como um esquema de Múltiplo Acesso pode mudar dinamicamente, um controlador ou gerente de um sistema pode reconhecer as necessidades de RC individuais de cada usuário, otimizando o uso do sistema. Entretanto, a quantidade de tempo necessária à transferência dessa informação de controle constitui uma sobrecarga e estabelece um limite superior na eficiência da utilização dos RC.

O tipo de controle utilizado irá variar de sistema para sistema e sua aplicação.

Um exemplo clássico de aplicação de técnicas de múltiplo acesso é na comunicação via satélite, onde RC (equipamentos do satélite, tais com transponders, antenas, etc) devem ser utilizados por um grande número de usuários, que seriam as estações de comunicação espalhadas ao longo do globo terrestre.

## Fluxo da Informação no Múltiplo Acesso

O objetivo principal de um sistema de Múltiplo Acesso é prover serviço de telecomunicações aos usuários a tempo e de forma eficiente. Muitas vezes, para atingir esse objetivo, é preciso coordenar ações de controle entre os usuários participantes, para distribuição adequada dos RC's, principalmente em casos onde a disputa entre usuários é inevitável (isto é, vários usuários tentando acessar simultaneamente o mesmo RC).

Para isso, ele faz uso de algoritmos e protocolos de controle, que podemos denominar MMA (Multiple Access Algorithm), que é a regra pela qual o usuário sabe como gerenciar o tempo, a frequência e as funções de código para utilizar de forma eficiente os RC's disponíveis.

A Figura 1-8 é uma ilustração descrevendo o fluxo básico de informação entre o MMA e os usuários.

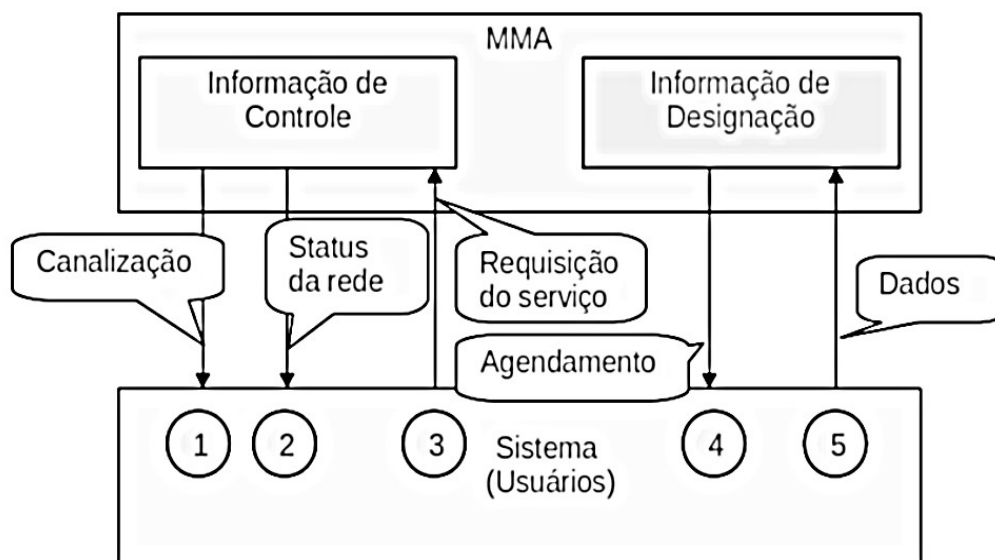


Figura 1-8

Essa caracterização é geral, e deve ser adaptada aos diversos Sistemas de Comunicação. Em certos sistemas, a arquitetura do próprio sistema impõe outra organização para o Múltiplo Acesso. O esquema da Figura 1-8 aplica-se perfeitamente ao Múltiplo Acesso utilizado nos sistemas satélite.

Em relação à Figura 1-8, temos:

1. Canalização – Este termo refere-se à forma mais geral de informação de alocação.

(p. ex., canais 1 a N podem ser alocados ao usuário A, canais de (N+1) a M para o usuário B, etc).

2. Status da Rede (NS) – Este termo refere-se à disponibilidade dos RC's e informa ao usuário a qual recurso (isto é, tempo, frequência, código) ele deve se posicionar para transmitir as requisições de serviço.

3. Requisição do serviço – Ocorre quando o usuário perfaz a requisição para o serviço pretendido (p. ex., alocação de um Intervalo de Tempo  $m$ ).

4. Agendamento- Um mapa, transmitido do MMA para o usuário, informando a este quando e onde posicionar seus dados para a utilização pretendida dos RC's.

5. Dados – Representa a transmissão da informação do usuário segundo o agendamento estabelecido.

## Formas Básicas de Múltiplo Acesso

Existem 5 formas básicas de Múltiplo Acesso:

- 1- Divisão em Frequência (FD – Frequency Division) – sub-bandas específicas de frequência são alocadas aos usuários.
- 2- Divisão no Tempo (TD – Time Division) – Intervalos de tempo periodicamente recorrentes são identificados. Em alguns sistemas, aos usuários é estabelecida uma designação fixa no tempo. Em outros, aos usuários é dado um acesso aleatório.

Neste caso, como o sinal representativo da informação de cada usuário é necessariamente um sinal discreto no tempo, este sinal deve ser digital.

- 3- Divisão de Código (CD – Code Division) – Membros específicos de um conjunto adequado de códigos de espalhamento espectral (usando cada um a totalidade da banda disponível) são alocados.

Esta técnica também exige que o sinal gerado pelo usuário seja digital.

- 4- Divisão Espacial (SD – Spatial Division) – Antenas direcionais permitem o reuso de frequências separando espacialmente feixes de rádio em diferentes direções.
- 5- Divisão de Polarização (PD – Polarization Division) - Polarizações ortogonais são usadas para separar sinais, permitindo o reuso da mesma banda de frequências. Usado bastante em comunicações satélite.

## **Tipo de Informação**

A informação a ser transportada pelo sistema de Comunicações pode ser classificada de diversas formas.

Podemos, por exemplo, considerar o tipo de sinal a ser transmitido e a informação pode ser representada por um sinal analógico ou digital.

Podemos ainda considerar o serviço de telecomunicações principal para o qual o sistema se destina (serviço telefônico, constituindo as redes telefônicas, e o serviço de transmissão e conexão de dados que constitui o conjunto de serviços oferecidos na Internet), então temos informação de telefonia e informação de multimídia.

Entretanto, falando de forma mais geral, a informação pode ser classificada em relação às exigências impostas à rede, independente da tecnologia utilizada.

Essas exigências dizem respeito principalmente às características de transporte da informação.

Assim, podemos separar a informação em dois tipos: aquela que exige característica de transporte em tempo real, e aquela que suporta um atraso significativo no transporte.

Por exemplo, considerando uma informação de voz sendo conduzida por uma rede telefônica no serviço telefônico normal, o retardo ou atraso no transporte deve ser o menor possível (tipicamente, da ordem de 500ms no máximo; retardos maiores poderão ocasionar problemas na transmissão e recepção dos sinais telefônicos, prejudicando a inteligibilidade da comunicação).

Outro exemplo de informação que deve ser enviada em tempo real é na transmissão ao vivo de sinais de TV.

Podemos obter ainda outro exemplo de transmissão em tempo real quando da transmissão de dados bancários e de cartão de crédito. Assim, um terminal bancário remoto deve ter seus dados processados pelo banco no menor tempo possível, bem como um cartão de crédito passado numa maquininha num restaurante ou num posto de gasolina, se bem que as exigências de retardo da informação são menores que para o caso de transmissão telefônica ou de TV, isto é, suporta mais retardo na transmissão que a informação telefônica ou de TV.

Como exemplo de transmissão em tempo não real, temos a informação de dados enviada para um serviço mail de mensagens na Internet. Desde que a mensagem não se perca, retardos significativos podem ser tolerados (de horas, até). Este

retardo pode ser causado por tempos de armazenamento em nós de rede, enquanto a mensagem aguarda por disponibilidade de RC para transmissão a outro nó.

Como outro exemplo temos a transmissão de dados de mensagens de telemetria (em experimentos não críticos), e de serviços de transferência de documentos e mensagens de um modo geral.

Conclui-se, portanto, que independentemente da tecnologia utilizada para implementação das redes utilizadas na troca de informações, estas podem ser classificadas em informações que devem ser enviadas em tempo real e aquelas que suportam retardos significativos (horas, até) na transmissão.

Dois tipos de tecnologia de redes podem atualmente ser implantadas. As redes podem ser construídas baseadas em comutação de circuitos e redes baseadas em comutação de pacotes. Ambas as tecnologias podem ser usadas para a implantação de redes capazes de manipular informações em tempo real e em tempo não real.

Historicamente, a tecnologia de redes baseada na comutação de circuitos foi empregada em primeiro lugar, e é empregada até hoje, constituindo a espinha dorsal do sistema telefônico fixo e celular, e dos sistemas de transmissão de TV.

Com a evolução tecnológica, foram desenvolvidas tecnologias que possibilitaram a implantação de redes de dados baseadas na comutação de pacotes.

As redes baseadas na comutação de circuitos nasceram e foram desenvolvidas voltadas principalmente para a transmissão da informação em tempo real, e por isso podem ser facilmente adequadas à transmissão de informação em tempo não real.

As redes baseadas na comutação de pacotes surgiram com o desenvolvimento da comunicação de dados, em forma digital, sendo inicialmente usadas para transmissão de informações com retardos grandes demais para transmissão de sinais telefônicos e de TV.

Posteriormente, foram desenvolvidas tecnologias de comutação e de codificação de fonte (ATM, MPEG3, MPEG4, VoIP) que permitiram a transmissão, através da rede de pacotes, de informação com requisitos de retardo mínimo e garantias de qualidade de serviço (informação em tempo real). Isso possibilitou, por exemplo, o serviço telefônico a ser prestado na Internet.

## Comutação de Circuitos

Na comutação de circuitos, a conexão entre os terminais de usuários é inicialmente estabelecida e confirmada, ficando então disponível ao usuário para transmissão ou recepção de informações.

A conexão, uma vez estabelecida fica sempre disponível aos usuários envolvidos, todo tempo, mesmo quando não haja atividade no canal (ausência de sinal do usuário), até que seja então desfeita por um dos usuários envolvidos na comunicação.

Conforme a Wikipédia ([http://pt.wikipedia.org/wiki/Comutação\\_de\\_circuitos](http://pt.wikipedia.org/wiki/Comutação_de_circuitos)) “A comutação de circuitos, em redes de telecomunicações, é um tipo de alocação de recursos para transferência de informação que se caracteriza pela utilização permanente destes recursos durante toda a transmissão. É uma técnica apropriada para sistemas de comunicações que apresentam tráfego constante (por exemplo, a comunicação de voz), necessitando de uma conexão dedicada para a transferência de informações contínuas”.

A comutação de circuitos ocorre em um nó de rede, e basicamente ela interconecta entre si dois enlaces de transmissão, um de entrada no comutador à outro de saída para estabelecer uma conexão. No caso da rede telefônica, o comutador é denominado central de comutação. Havendo mais de um nó envolvido na conexão, haverá um número correspondente de comutadores.

A comutação de circuitos, historicamente, foi inicialmente empregada no sistema público de telefonia, para permitir a interligação de qualquer par de terminais telefônicos instalados, de modo que não fosse necessário a interligação de cada terminal instalado com todos os outros, para que cada terminal pudesse se comunicar com qualquer outro.

Assim, basta a interligação de cada terminal à central de comutação, que esta se encarrega de interligar qualquer par de terminais.

Estendendo esta ideia, tem-se a constituição de uma rede de telecomunicações, com vários nós onde estariam localizadas as centrais de comutação.

Os nós da rede podem ser interligado a terminais de usuários ou a outros nós, conforme mostra a Figura 1-1 (Introdução) para a constituição de uma rede.

Como a rede telefônica existe desde o século XIX, no início as centrais de comutação eram manuais e os circuitos comutados providos por meio analógico

(pares de fios metálicos). Mais tarde, com o crescimento da rede, e com a evolução tecnológica, os nós passaram a ser interligados por enlaces analógicos constituídos sobre MUX-FDM (Frequency Division Multiplex) e as centrais foram automatizadas, dispensando o uso de telefonistas para a interligação normal de circuitos. Ocorreu, então, o auge da tecnologia analógica. Aqui no Brasil isto ocorreu durante o século XX, na década de 1960. A tecnologia empregada nas centrais era a eletromecânica, e as centrais usadas então eram as chamadas passo a passo (mais antigas) que utilizavam motores de passo e as Cross-bar que utilizavam relés para implementar a comutação.

Nesse meio tempo havia surgido a tecnologia de transmissão a longa distância via satélite e via cabo submarino, que imperavam na realização de enlaces interurbanos usados em ligações nacionais de longa distância e internacionais.

A partir de 1970 começou o processo de digitalização da rede telefônica. Inicialmente, os circuitos de transmissão que interligavam os nós urbanos passaram a utilizar a tecnologia do PCM (Pulse Code Modulation), e rádio digital nos enlaces de micro-ondas que constituíam os circuitos interurbanos.

Nota-se que a digitalização sempre foi motivada por razões econômicas (a alternativa digital era mais barata que as opções analógicas).

Numa etapa posterior, o processo de digitalização se estendeu às próprias centrais, que passaram a utilizar a tecnologia CPA-T (Central Temporal com Programa Armazenado), possibilitando a integração dos processos de transmissão e comutação (As CPA-T utilizam internamente uma estrutura semelhante aos MUX-digitais), pois apresentam uma organização de canais análoga a um MUX-PCM 30 canais, que representa a hierarquia básica de multiplexação (estrutura de quadro de um MUX-TDM PDH operando a 2048kb/s).

PDH-TDM referia-se à tecnologia então empregada na constituição deste equipamento (Plesiochronous Digital Hierachy -Time Division Multiplex)

No final do século XX a tecnologia digital de transmissão foi aperfeiçoada, passando a incluir o MUX-SDH (Synchronous Digital Hierarchy) e Transmissão Ótica, tanto nos enlaces urbanos quanto interurbanos. Não esquecer a tecnologia dos enlaces via satélite e cabos submarinos, que incorporaram rapidamente a tecnologia digital, mais barata e eficiente do que sua alternativa analógica.

O final do século viu também o surgimento da tecnologia celular que acompanhou a evolução então verificada (quem não se lembra dos primeiros aparelhos celulares,

grandes, pesados e caros, utilizando tecnologia analógica?).

A rede telefônica, assim, constituiu-se em uma espécie de rede básica, dada a imensa penetrabilidade alcançada pelo serviço telefônico. Seu porte tornou-se gigantesco, e hoje serve de suporte à diversos outros serviços nas áreas de transmissão de dados e informação de áudio e vídeo em geral.

As próprias Empresas Operadoras do serviço público de telefonia constituem e concorrem em outras áreas com outras Empresas para prestação de serviços especializados, como a constituição de serviços de interligação de redes de dados, redes públicas de dados, fornecimento de acessos de alta velocidade, e até serviços multimídia. Alguns desses serviços utilizam os comutadores já instalados, outros não, limitando-se a utilizar o suporte de transmissão existente para a constituição de canalização para os novos serviços, ou mesmo a implantação de novas redes com equipamentos mais adequados aos novos serviços oferecidos, concorrendo diretamente com outras empresas especializadas.

Mesmo com a digitalização da rede telefônica, esta continuou a se basear na comutação de circuitos como principal forma de conduzir a informação através da rede telefônica instalada. Os nós de rede continuam utilizando a CPA-T, cuja canalização básica é de 64Kbit/s (corresponde à velocidade necessária para transporte, em formato digital, de um canal telefônico, com toda a sua limitação de banda).

## Comutação de Pacotes

No final do século XX a transmissão de dados era uma realidade. Com o avanço tecnológico foram viabilizadas muitas aplicações, incluindo-se o advento do PC pessoal. Qualquer pessoa tem a sua disposição, hoje, um poder computacional comparável à dos main-frames ou grandes computadores que surgiram em meados do século passado.

Além disso, a constituição de redes de dados, em caráter público e privado, possibilitou o surgimento de uma gama de aplicações que se expandiram e se beneficiaram do avanço tecnológico. Surgiu a Internet com novos serviços e aplicações na área de multimídia.

Conforme a Wikipédia ([http://pt.wikipedia.org/wiki/Comutação\\_de\\_pacotes](http://pt.wikipedia.org/wiki/Comutação_de_pacotes)) "No contexto de redes de computadores, a comutação de pacotes é um paradigma de comunicação de dados em que pacotes (unidade de transferência de informação) são individualmente encaminhados entre nós da rede através de ligações de dados tipicamente partilhadas por outros nós. Este contrasta com o paradigma *rival*, a comutação de circuitos, que estabelece uma ligação virtual entre ambos nós para seu uso dedicado durante a transmissão (mesmo quando não há nada a transmitir)".

Desta forma, a comutação de pacotes pressupõe a digitalização da informação.

Fisicamente, é implementada através de roteadores de dados (por exemplo, roteadores IP).

- 

## Sinal Analógico

Um sinal analógico é aquele caracterizado por valores que podem variar continuamente em uma faixa.

Por exemplo, o sinal elétrico, ou forma de onda, resultante da captação das vibrações sonoras da voz humana por um microfone, representa um sinal analógico.

De um modo geral, podemos dizer que o sinal analógico está ligado à forma de onda do sinal elétrico que o representa.

Conforme Wikipedia ([http://pt.wikipedia.org/wiki/Sinal\\_analógico](http://pt.wikipedia.org/wiki/Sinal_analógico)) "um sinal

analógico é um tipo de sinal contínuo que varia em função do tempo. Um velocímetro analógico de ponteiros, um termômetro analógico de mercúrio, uma balança analógica de molas, são exemplos de sinais lidos de forma direta sem passar por qualquer decodificação complexa, pois as variáveis são observadas diretamente. Para entender o termo analógico, é útil contrastá-lo com o termo digital. Na eletrônica digital, a informação foi convertida para bits, enquanto na eletrônica analógica a informação é tratada sem essa conversão.

Sendo assim, entre zero e o valor máximo, o sinal analógico passa por todos os valores intermediários possíveis (infinitos), enquanto o sinal digital só pode assumir um número pré-determinado (finito) de valores.”

## Sinal Digital

Ainda citando a Wikipedia ([http://pt.wikipedia.org/wiki/Sinal\\_Digital](http://pt.wikipedia.org/wiki/Sinal_Digital)) “Sinal Digital é um sinal com valores discretos (descontínuos) no tempo e em amplitude. Isso significa que um sinal digital só é definido para determinados instantes de tempo, e que o conjunto de valores que pode assumir é finito.”

Por exemplo, um texto escrito é uma mensagem digital construída a partir de aproximadamente 50 símbolos, que são as 26 letras do alfabeto gramatical, os 10 símbolos numéricos e sinais de pontuação e inflexão.

Um tipo particular de sinal digital é o sinal binário. Sinais binários são construídos

a partir de um alfabeto binário. Um alfabeto binário é composto de apenas 2 símbolos, A e B, Branco e Preto, 0 e 1, a partir dos quais são definidas operações lógicas e matemáticas envolvendo os dois símbolos.

O alfabeto binário é básico na natureza. Diversas funções físicas podem assumir um (1) entre dois estados possíveis, e assim podem ser usadas para implementação de mensagens digitais. Um relé pode estar ligado ou desligado, um transistor pode estar em saturação ou em corte, etc. Existe uma matemática associada a mensagens binárias, onde são definidas operações como soma, subtração, multiplicação e divisão, a partir das quais todo um conjunto de funções matemáticas pode ser definido. Esta linguagem, baseada em um alfabeto binário, é a linguagem básica usada internamente com máquinas, como um processador e os dispositivos periféricos que compõem uma placa mãe em um microcomputador. Um símbolo binário é chamado bit (de "binary unit") e pode assumir por definição dois valores, por convenção, 0 e 1. Uma sequência de 8 bits é chamada de byte (abrevia-se B).

A linguagem de programação em nível de máquina é binária. As máquinas programáveis, como por exemplo um processador, em última instância devem seguir instruções escritas em binário. A base binária (base 2) para o homem, é, entretanto, pouco eficiente.

Imagine o problema para construir uma placa de circuito impresso, que deve conter trilhas de cobre interligando diversos componentes, como por exemplo um processador a uma unidade de memória. Por hipótese, seja uma memória capaz de armazenar o valor de até 1048575 bits (valor nominal 1Mbit). Para endereçar cada um desses bits, numa base binária, seriam precisas 19 trilhas de circuito impresso. Cada trilha de cobre carrega o valor de 1 bit, ou seja uma tensão equivalente ao valor 0 ou uma tensão equivalente ao valor 1.

Agora, se usarmos uma base decimal, com 10 algarismos, 0,1,2,...,8,9, o nível de tensão em cada trilha pode significar uma potência de 10. Desta forma, bastaria 6 trilhas para endereçar, com folga, a memória de 1MB.

É muito comum o emprego de um sistema numérico em base 16, chamado sistema hexadecimal. Este sistema, como o nome indica, utiliza 16 algarismos. Para representar os algarismos acima dos 9, utilizamos em sequência as letras do alfabeto. Desta forma, o 10 seria a letra a, o 11 a letra b, até o 15, que será representado pela letra f, completando assim 16 algarismos, 0,1,2,...,d,e,f. Desta forma, a tensão em cada trilha ou representa 0 ou representa uma potência de 16.

Assim, basta 5 trilhas para endereçar, com folga, 1 MB de memória.

Atualmente existem as linguagens chamadas de “nível intermediário”, e “alto nível”, que são mais adequadas ao homem. Assim, um processador pode ser programado de forma bem mais simples. Entretanto, o programa escrito nesta linguagem ou outras semelhantes precisa se “traduzido” em linguagem binária.

Não devemos esquecer que os chips internamente operam em base binária. Além disso, cada nível de tensão, que representam os bits, são fisicamente um pulso de tensão, devendo obedecer a especificações de formato e posição no tempo. Estas especificações podem ser encontradas nos “data sheets” de cada componente digital.

## Sistema Analógico

Um sistema analógico é aquele projetado para processar sinais derivados diretamente de sinais analógicos, isto é, sinais que podem variar continuamente em uma faixa de valores.

### **Exemplos de sistemas analógicos:**

1-Um amplificador convencional.

2-Linha telefônica de assinante fixo convencional (conjunto formado pelo aparelho fixo e o par de fios de cobre que conecta o aparelho à central telefônica ou armário).

3-Sistema de radiodifusão comercial (AM - ondas médias e FM - frequência modulada).

4-Sistema de televisão analógico ( tele difusão comercial – VHF).

## **Sistema Digital**

Um sistema digital é aquele projetado para processar sinais derivados diretamente de sinais digitais, ou seja, são sistemas que estão projetados para lidar eficientemente com sinais que foram gerados a partir de um alfabeto finito de símbolos.

### **Exemplos de sistemas digitais:**

- 1-Uma moderna central de comutação telefônica;
- 2-Moderno sistema de comunicação via satélite;
- 3-Sistemas de telefonia móvel GSM;
- 4-Sistemas de televisão digital.

Sistemas analógicos são projetados para manter a integridade da forma de onda

do sinal, enquanto sistemas digitais são projetados para manter a integridade dos símbolos transmitidos.

Assim, em um sistema analógico qualquer distorção ou ruído associado a forma de onda do sinal representa uma alteração da mensagem original, e portando constitui-se em perda de informação. Em um sistema digital, distorções e ruídos podem ocorrer na forma de onda sem haver necessariamente perda de informação, desde que a mensagem original possa ser reconstituída a partir do sinal recebido, ou seja, que a mensagem original seja reconhecível a partir de um sinal recebido que pode estar distorcido e com ruído adicionado.

Por exemplo, podemos considerar que uma página manuscrita é um sistema de comunicação digital. A fonte de informação é o cérebro da pessoa que escreveu, ou digitou, o texto manuscrito, e o destino é o cérebro da pessoa que o lê.

Desde que o texto esteja escrito em um idioma conhecido da pessoa que lê, e a informação consegue ser impressa no papel de uma forma que possa ser mecanicamente percebida (por exemplo, se a caneta ou objeto utilizado na escrita apresenta poucas falhas) a informação é transmitida com poucos erros ou mesmo sem erros, não importando (até certo ponto) a forma exata de cada símbolo escrito, ou até mesmo se todos os símbolos conseguem ser lidos.

## **Conversor A/D e Conversor D/A**

Um sinal proveniente diretamente de uma mensagem analógica pode ser transmitido por um sistema digital convertendo a informação contida na forma de onda do sinal analógico em símbolos de um alfabeto finito.

Um sinal proveniente diretamente de uma mensagem digital pode ser transmitido por um sistema analógico convertendo a informação contida nos símbolos de uma mensagem digital em formas de onda adequadas ao sistema analógico sendo utilizado. Um exemplo prático do uso de conversores A/D (analógico digital) e conversores D/A (digital analógico) em um sistema de telecomunicações está apresentado na Figura 1-3, para o serviço telefônico fixo.

As centrais, equipamentos de comunicação, e outros do sistema telefônico são digitais. Entretanto, a rede fixa que atende aos usuários é formada por pares de fios

de cobre que em conjunto com o aparelho fixo constitui um sistema analógico.

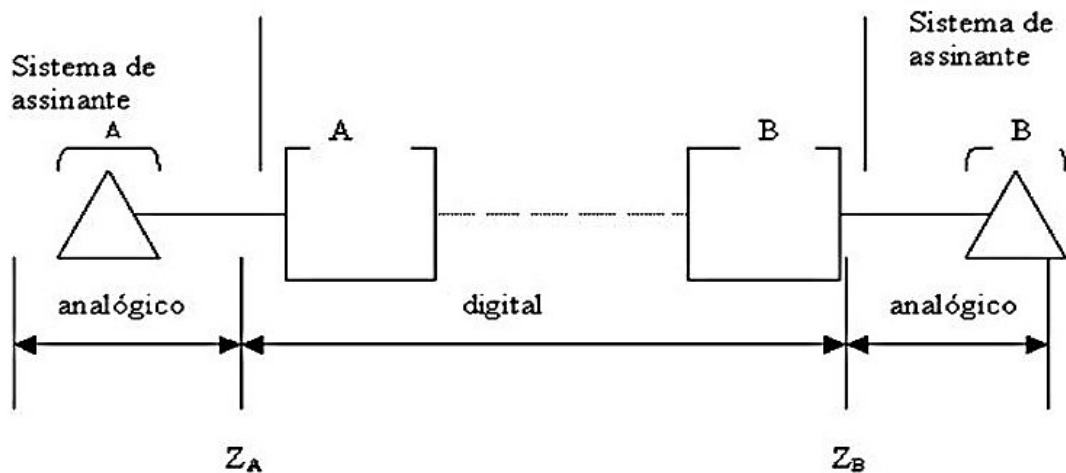


Figura 1-3

O telefone **A** está conectado à central telefônica **A** ou armário de rede **A**, e o telefone **B** à central telefônica **B** ou armário de rede **B**. As centrais são digitais, e os circuitos de comunicação que as interligam são constituídos também por sistemas digitais. Entretanto, os respectivos sistemas de assinantes são analógicos (o par de fios e o aparelho telefônico fixo). Desta forma, nas interfaces **Z** (**Z<sub>A</sub>** ou **Z<sub>B</sub>**) da Figura 1.3, há necessidade da utilização de conversores A/D e conversores D/A.

## Conversão A/D e D/A tipo PCM

Este conversor atende ao princípio básico da amostragem e emprega as ideias da tomada de amostras, da quantização e da codificação binária na conversão A/D. É o conversor recomendado pelo ITU para utilização na interface **Z** dos sistemas de telefonia fixa.

Podemos identificar três etapas funcionais em um conversor A/D PCM, conforme a Figura 1-4.

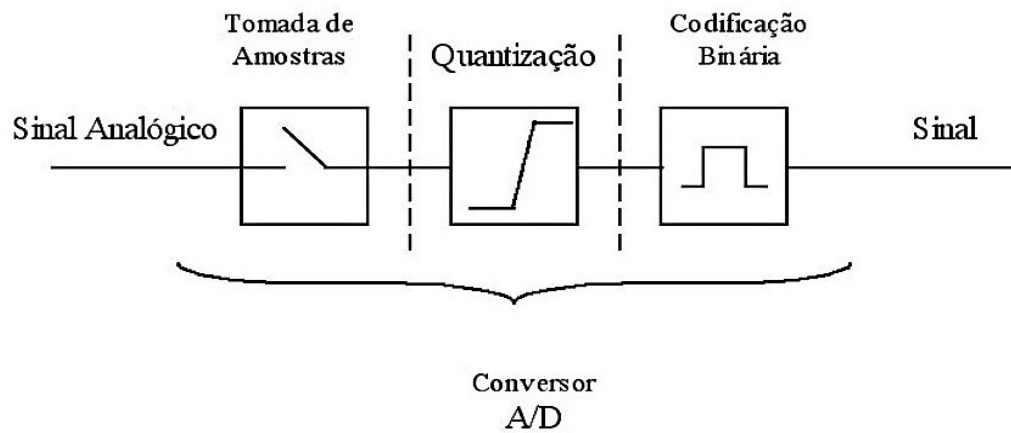


Figura 1-4

### **Amostragem ou Tomada de Amostras**

A etapa de amostragem em um conversor A/D de um sistema PCM consiste em obter valores, ou medir o sinal analógico, em determinados instantes de tempo. Uma amostra de um sinal analógico consiste, portanto, do valor que este sinal possui em um determinado instante. A Figura 1-5 ilustra a obtenção de uma amostra do sinal  $x(t)$  no instante  $t_0$ . Essa amostra pode ser matematicamente indicada por  $x(t_0)$ .

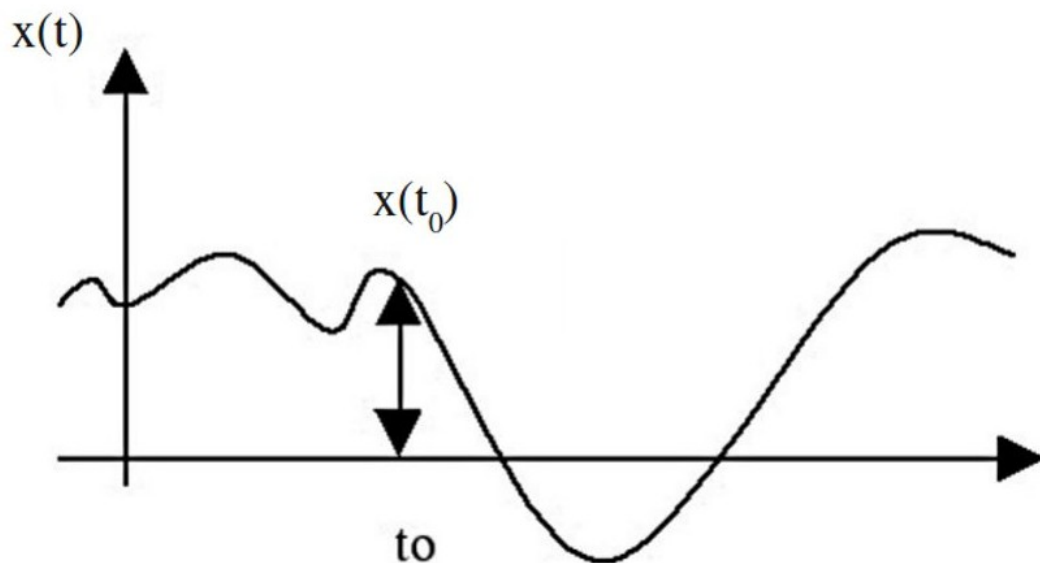


Figura 1-5

No sistema PCM, a amostragem é realizada tomando-se amostras igualmente espaçadas no tempo, a uma taxa que garante não haver perda de informação do sinal  $x(t)$

A taxa de amostragem deve obedecer ao Teorema da Amostragem, que estabelece:

*"Um sinal limitado em faixa, em BHz (isto é, um sinal cujo espectro de frequência é zero para frequências acima de BHz) é univocamente determinado por seus valores, tomados à intervalos de tempo uniformes e inferiores a  $1/2B$  segundos".*

No sistema PCM utilizado em telefonia fixa, a taxa de amostragem é fixada em  $f_s = 8\text{kHz}$ . Esta taxa atende ao teorema acima mencionado, pois o sinal telefônico analógico, tem espectro (o conceito de espectro será detalhado adiante) limitado à 3.400Hz. Pelo teorema da amostragem, a taxa mínima seria, portanto, 6.800Hz. Por razões práticas, utiliza-se a taxa de 8.000Hz.

### **Quantização**

A quantização é realizada sobre o sinal amostrado, e atua aproximando o valor de cada amostra a valores pré-fixados. Cada amostra é a "ajustada" ao valor do intervalo de quantização mais próximo do valor real da amostra. Desta forma,

ocorre uma quantização da escala vertical que indica o valor de uma amostra.

Uma vez estabelecido um “range”, ou limites, para a faixa de valores que uma amostra pode assumir, a quantização estabelece o número máximo de valores a serem codificados.

No sistema PCM, a quantização é feita definindo-se um total de 256 intervalos distintos na escala vertical, sendo 128 positivos e 128 negativos. Cada amostra é então aproximada para o valor de cada intervalo, mais próximo do valor real da amostra.

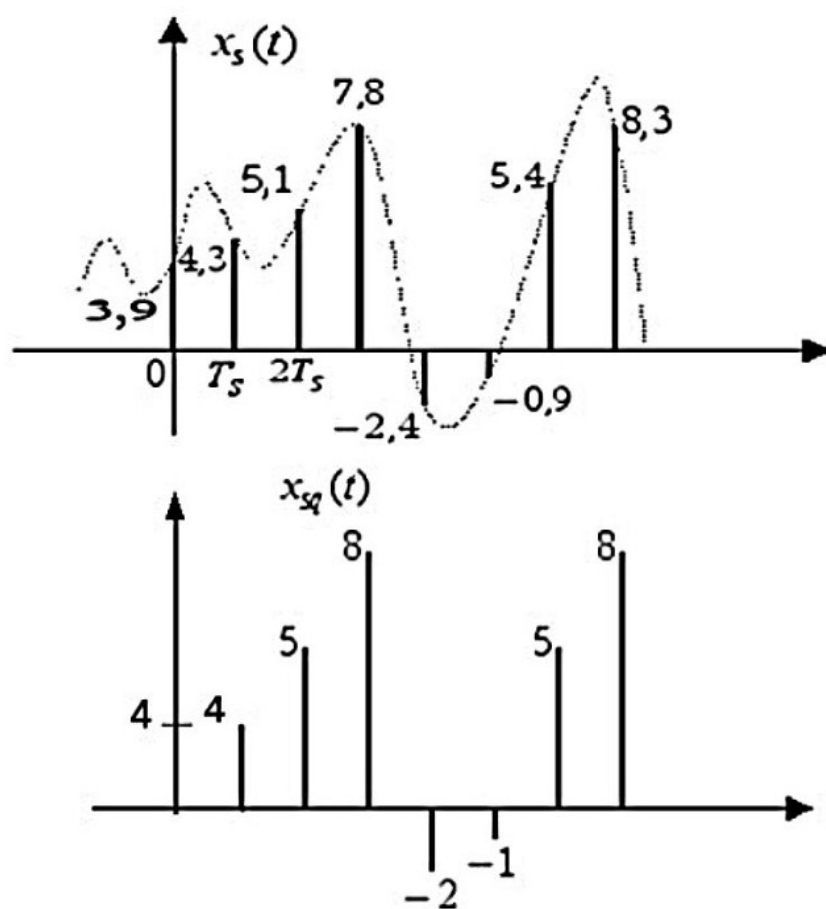


Figura 1-6

Assim, por exemplo, na Figura 1-6, a amostra em  $2T_s$ ,  $x_s(2T_s) = 5,1$ , foi aproximada para o intervalo de valor = 5.

### **Codificação**

A codificação transforma cada amostra quantizada em um código digital binário.

O código digital binário tem comprimento fixo, isto é, o tamanho de cada palavra do código é constante e igual a  $N$  bits. O número total de níveis de quantização,  $L$ , determina o tamanho do código  $N$ , pois a cada nível de quantização corresponde uma palavra do código binário, portanto  $N = \log_2 L$ .

Por exemplo, suponha que  $L = 16$ , ou seja, a escala vertical que mede o valor das amostras é dividida em 16 intervalos.  $N = \log_2 16 = 4$ . A cada nível de quantização, ou seja a cada um dos 16 intervalos, faz-se corresponder uma palavra do código binário, no caso com  $N = \log_2 16 = 4$  bits.

| Nº do intervalo | Código Binário | Saída NRZ do codificador |
|-----------------|----------------|--------------------------|
| 0               | 0000           |                          |
| 1               | 0001           |                          |
| 2               | 0010           |                          |
| 3               | 0011           |                          |
| 4               | 0100           |                          |
| 5               | 0101           |                          |
| 6               | 0110           |                          |
| 7               | 0111           |                          |
| 8               | 1000           |                          |
| 9               | 1001           |                          |
| 10              | 1010           |                          |
| 11              | 1011           |                          |
| 12              | 1100           |                          |
| 13              | 1101           |                          |
| 14              | 1110           |                          |
| 15              | 1111           |                          |

Quadro 1

O Quadro 1 ilustra este procedimento, apresentando também uma ideia do sinal elétrico que representa o código na saída do conversor A/D.

No sistema PCM empregado nas centrais telefônicas da telefonia fixa, uma vez que são utilizados 256 níveis de quantização,  $N = \log_2 256 = 8$ , o codificador gera palavras de 8 bits.

Sendo que a taxa de amostragem é  $f_s = 8.000$  Hz (8.000 amostras por segundo),

$L=256$  níveis de quantização, a cada amostra corresponde uma palavra binária com  $N = 8$  bits. A taxa final em bit/s na saída do codificador é:

$$r = 8.000 \times 8 = 64.000 \text{ bit/s}$$

### **Conversão D/A**

Podemos identificar duas etapas funcionais em um conversor D/A, mostradas na Figura 1-7.

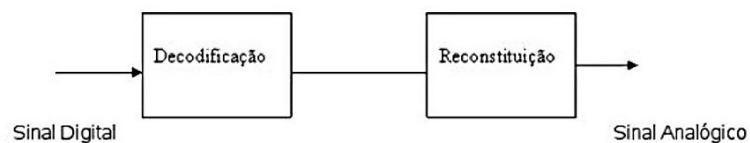


Figura 1-7

### **Decodificação**

A decodificação é a etapa responsável por gerar valores de amostras correspondentes ao código digital recebido.

Esta geração é feita eletronicamente à partir de um conjunto de fontes de corrente, mostradas na Figura 1-8, que são acionadas conforme o código recebido, gerando assim um valor de tensão correspondente à amostra codificada.

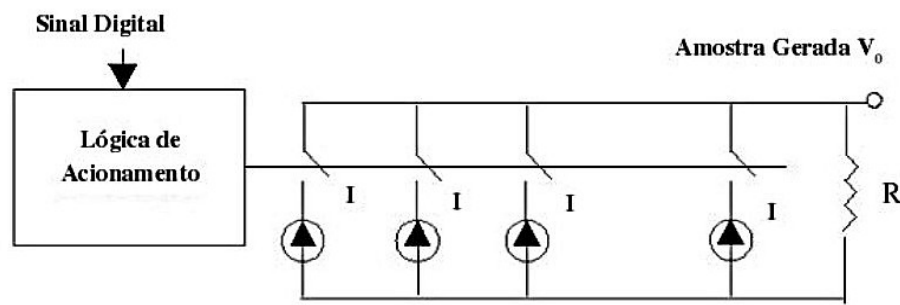


Figura 1-8

Observa-se que a amostra gerada pelo decodificador corresponde ao valor quantizado da amostra, pois este é o valor transmitido pelo código. Desta forma, no processo codificação/decodificação, o valor real da amostra original é perdido, sendo possível apenas recuperar o valor quantizado, o qual, corresponde numericamente ao nível médio do intervalo de quantização mais próximo da amostra verdadeira do sinal.

Desta forma, a amostra recuperada a partir do código recebido é uma aproximação da amostra original do sinal.

### **Reconstituição do sinal analógico**

A segunda etapa, etapa de reconstituição, pretende recompor o sinal analógico original, que havia sido amostrado no conversor A/D, a partir das amostras geradas no decodificador.

Segundo o teorema da amostragem, a reconstituição do sinal analógico será possível através de uma operação de filtragem das amostras, no caso um filtro passa baixa, conforme mostra a Figura 1-9.

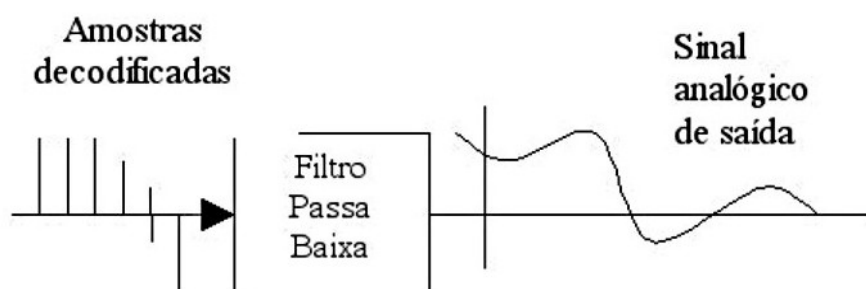


Figura 1-9

### **Ruído de quantização**

Como as amostras geradas na etapa de codificação constituem aproximações das amostras reais originais, devido ao processo de quantização, o sinal analógico de saída do conversor D/A não é exatamente igual ao sinal original, mas sim à um suposto sinal análogo do qual pode-se derivar a sequência de amostras codificadas, recebidos pelo conversor D/A, que é o sinal quantizado.

Essa diferença traduz-se em perda de informação do sinal original, pois a informação analógica está contida na forma de onda.

Na prática, esta perda de informação pode ser encarada como se houvesse um ruído associado ao sinal analógico reconstituído. Este é um tipo especial de ruído, pois está associado ao processo de conversão A/D-D/A, e tem características especiais. É chamado ruído de quantização. Para reduzir este valor de ruído a um nível aceitável, normas internacionais especificam a utilização da quantização não uniforme.

## **Transmissão Digital**

Em um sistema digital, quando uma mensagem é transmitida, tem que ser convertida em formas de onda adequadas ao meio de transmissão e provavelmente cada símbolo do alfabeto da mensagem corresponderá a uma forma de onda específica.

Na transmissão digital, ocorre a discretização em amplitude e no tempo do sinal a ser transmitido, sendo um bom exemplo o sinal de saída em um conversor A/D. Genericamente, são transmitidos símbolos, os quais são convenientemente agrupados para constituir as palavras da mensagem, por meio da codificação. Esses símbolos podem ser elementos de várias dimensões, isto é, n-ários, e podem ser matematicamente representados por vetores de n dimensões. Um tipo muito usado é o símbolo binário, com 2 dimensões (isto é, o símbolo a ser transmitido corresponde à uma escolha entre duas opções, por exemplo 0 ou 1, ou 2 bits). Uma palavra é normalmente constituída por vários símbolos agrupados.

Na prática, para que a transmissão efetivamente ocorra através de um sistema físico, é necessário a conversão dos símbolos em energia física de uma forma de

onda, que se propaga através do meio de transmissão, transportando assim a informação contida nas mensagens, ocupando uma certa faixa de frequências no canal de transmissão (temos, então, a modulação digital). Hoje em dia, são muito empregados sistemas físicos elétricos e óticos, onde a forma de onda é uma forma de energia eletromagnética. Basicamente, o que distingue um do outro é a faixa de frequências ocupada. No caso de sistemas elétricos, o espectro eletromagnético se estende até cerca de  $10^{12}$ Hz, e no caso de sistemas óticos até próximo de  $10^{15}$ Hz (ver [pt.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_eletromagnético](http://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro_eletromagnético))

Só para exemplificar, suponha que tenhamos uma mensagem binária, e que o bit '1' seja transmitido por um sinal elétrico constante e igual a 1V, e o bit '0' por um sinal elétrico e constante igual a -3 Volts. Uma palavra como 10011011 teria a forma de onda conforme representado na Figura 1-10.

.

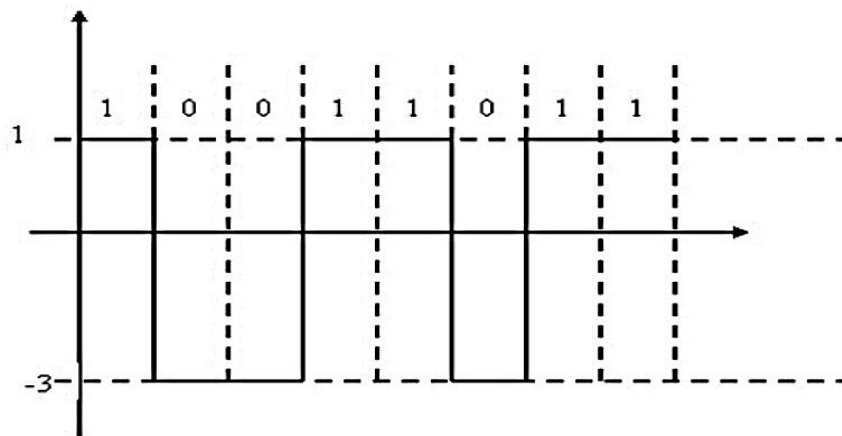


Figura 1-10

Este sinal poderia enviado ao meio de transmissão, que pode ser um cabo de fios elétricos, por exemplo, O cabo transmitirá este sinal ao receptor. No processo de transmissão, poderão atuar distorções e interferências sobre este sinal.

No sistema digital, o que importa é o reconhecimento, pelo receptor, da mensagem original; a forma de onda percebida pelo receptor pode ser bastante distorcida ou sofrer bastante deterioração por ruído, distorções e interferências.

Técnicas diversas são utilizadas, que poderão permitir a reconstituição da forma de onda digital. Assim todas as deteriorações agregadas ao sinal durante a transmissão pelo meio de transmissão podem ser até completamente superadas.

Desta forma, a figura de mérito para um sistema de comunicação digital pode ser a possibilidade de que o receptor cometa um erro, ou equívoco, ao detectar um símbolo ou dígito. Este valor de figura de mérito é a taxa de erro, ou probabilidade de erro, de dígito ou de símbolo.

Quando os bits são organizados em palavras de um certo comprimento (por exemplo, uma palavra de 8 bits se constitui em 1 (um) byte), e um conjunto de N bytes constitui uma mensagem, dependendo da organização do sistema, a taxa de erro de mensagens pode ser também um parâmetro de avaliação de qualidade.

## Sinais Senoidais

Os dois sinais na representados na Figura 1-11 possuem a mesma forma de onda (ambos são sinais senoidais), entretanto não podemos dizer que são iguais. O que distingue um do outro?

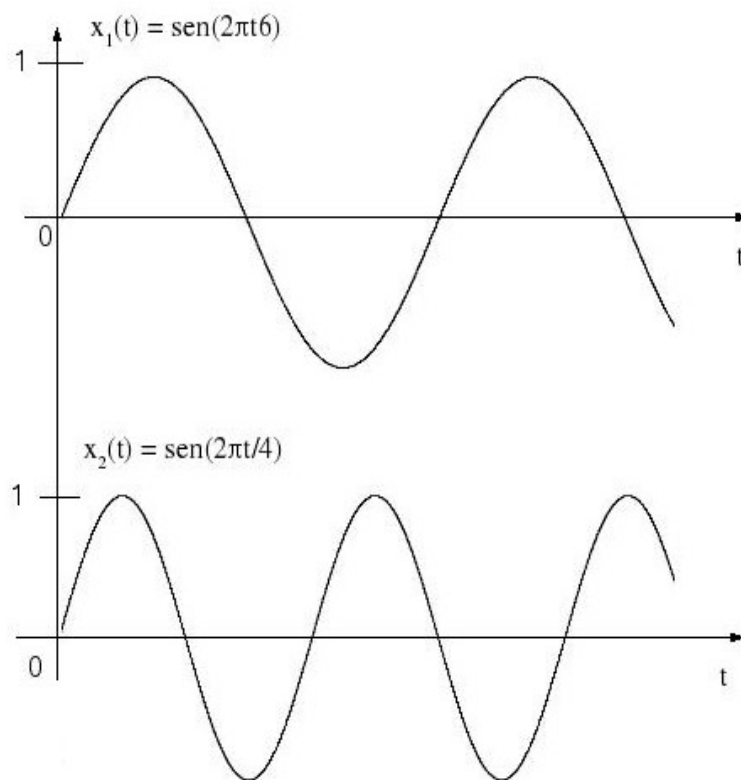


Figura 1-11

O que distingue um do outro é a frequência. Efetivamente, a forma de onda é a mesma, entretanto cada sinal é diferente do outro.

$x_1(t)$  é um sinal senoidal de frequência  $f_1 = 1/6\text{Hz}$ ,

$x_2(t)$  é um sinal senoidal de frequência  $f_2 = 1/4\text{Hz}$ .

Consideramos que um sinal senoidal, isto é, um sinal que matematicamente pode ser representado pela equação no tempo:

$$x(t) = A \cos (\omega_0 t + \theta)$$

sendo  $\omega_0$ ,  $A$  e  $\theta$  constantes, é um sinal que possui uma única frequência,  $\omega_0$  rad/s ou  $f_0 = \omega_0 / 2\pi$  Hz.

Assim, em teoria de comunicações, consideramos que a ocorrência de um sinal que só possua uma única frequência está associado à ocorrência de um sinal senoidal puro.

A frequência pode ser medida em rad/s ( $\omega_0$ ) ou Hertz ( $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ ), sendo então, a frequência considerada característica intrínseca de um sinal senoidal puro.

Exemplos :

1-Sinal de teste com 800Hz.

Significa um sinal senoidal com frequência de  $f_0=800$ Hz. Geralmente, a amplitude do sinal é indicada indiretamente, através da especificação da potência média do sinal.

2-Portadora com frequência 1MHz.

Significa um sinal senoidal com  $f_0=1$ MHz. A amplitude pode ser diretamente indicada ou, indiretamente através da potência média do sinal.

## Espectro de Frequências de um Sinal

Um sinal eletromagnético, para se propagar através de um meio de transmissão, transportando informação útil, ocupa uma certa faixa de frequências do espectro eletromagnético. Esta faixa depende de diversas características do sistema, que no final resultam em um espectro de frequências característico do sinal, que representa a gama de frequências ocupadas pela emissão do sinal.

Conforme Wikipédia ([http://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_de\\_frequência](http://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro_de_frequência)) “**Espectro de frequência** é a análise de uma determinada variável no domínio da frequência. O espectro pode ser visualizado através de um gráfico da variável pela frequência.”

Quando um sinal qualquer  $x(t)$  não é senoidal, ele pode ser decomposto ou escrito em termos de componentes senoidais.

Se o sinal  $x(t)$  é periódico, isto é, se seu valor se repete a intervalos periódicos de tempo, suas componentes senoidais têm frequência bem definida. Assim, se o período de repetição do sinal for  $T$  segundos, as componentes senoidais do sinal têm frequências múltiplas de  $f_0 = 1/T$  Hz.

Dependendo da forma de onda do sinal  $x(t)$ , existirá um conjunto de componentes senoidais que o caracteriza (obtido através da chamada série de Fourier do sinal periódico). Assim, cada componente do conjunto possui uma amplitude e uma fase relativa própria e uma frequência, no caso, múltipla de  $f_0$  (fundamental). Esse conjunto de frequências, ou de componentes senoidais, é chamado de espectro de frequências do sinal  $x(t)$ . Nesse caso, em que  $x(t)$  é periódico, dizemos que o espectro de frequências é discreto, pois só aparecem componentes em valores de frequência específicos, múltiplos da fundamental ( $f_0$ ,  $2f_0$ ,  $3f_0$ ,  $4f_0$ , etc).

Se o sinal  $x(t)$  não possuir características de sinal periódico, não existe a figura da fundamental, e o espectro de frequências é uma função contínua de  $\omega$ . A energia contida no sinal está espalhada em regiões do espectro e não está concentrada em determinadas frequências, como no sinal periódico. Por isso, a rigor, um sinal não periódico apresenta não um espectro de frequências, mas sim um espectro de densidade de frequências, ou seja, uma função que representa a contribuição relativa de uma faixa de frequências para o sinal  $x(t)$ . Esta função é obtida através da transformada de Fourier.

## Largura de Banda

Segundo Wikipédia ([http://pt.wikipedia.org/wiki/Largura\\_de\\_banda](http://pt.wikipedia.org/wiki/Largura_de_banda)) “a largura de banda é um conceito central em diversos campos de conhecimento, incluindo teoria da informação, rádio, processamento de sinais, eletrônica e espectroscopia. Em rádio comunicação ela corresponde à faixa de frequência ocupada pelo sinal modulado. Em eletrônica normalmente corresponde à faixa de frequência na qual um sistema tem uma resposta em frequência aproximadamente plana”

Largura de banda ( $W$  em Hz) de um canal representa a faixa de frequências que pode ser transmitida pelo canal com razoável fidelidade.

Largura de banda ( $B$  em Hz) de um sinal representa a faixa de frequências ocupada pelo sinal.

A largura de banda,  $W$  Hz de um canal é proporcional à capacidade de transmissão de informação do canal. Quanto maior a largura de banda, maior a taxa de transmissão de informação<sup>1</sup> que pode ser transmitida pelo canal.

Normalmente, o sistema que gerou o sinal com largura de banda  $B$  tem  $W=B$ , e aquele que recebe este sinal é ajustado para uma largura de banda  $W$  também igual a  $B$ . O canal de transmissão, pode ter largura de banda  $W>B$ , podendo propagar vários sinais simultaneamente, cada um com uma largura de banda  $B$  diferente. Dependendo do processo usado para identificar cada sinal na recepção, eles poderão ou não se sobrepor em faixa de frequências no canal.

---

<sup>1</sup> A taxa de transmissão da informação é um conceito geral, introduzido pelos estudos de Shannon e Nyquist. É válida tanto para sinais analógicos quanto digitais. A unidade de medida da informação é o *bit*, e a taxa de informação é medida em *bit/s*.

## Relação Sinal/Ruído (S/N)

A Wikipédia () apresenta a seguinte definição:

“**Relação sinal-ruído** ou **razão sinal-ruído** (frequentemente abreviada por **S/N** ou **SNR**, do inglês, **signal-to-noise ratio**) é um conceito de telecomunicações também usado em diversos outros campos que envolvem medidas de um sinal em meio ruidoso, definido como a razão da potência (S) de um sinal e a potência do ruído sobrepôsto ao sinal (N)”.

Em termos menos técnicos, a relação sinal-ruído compara o nível de um sinal desejado (música, por exemplo) com o nível do ruído de fundo. Quanto mais alto for a relação sinal-ruído, menor é o efeito do ruído de fundo sobre a detecção ou medição do sinal.

Normalmente, a potência S do sinal tem relação direta com a qualidade de transmissão.

O sistema de transmissão está sujeito à efeitos de ruídos, interferências e distorções.

O aumento de S, potência do sinal, reduz o efeito do ruído (aqui incluídas as interferências) no canal, e a informação é recebida com mais precisão, isto é , com menos incertezas, ou erros. Isto equivale a aumentar a relação Sinal/Ruído (S/N), onde S significa potência média do sinal e N significa potência média do ruído (do inglês “Noise”).

Uma relação sinal ruído (S/N) maior também permite que a transmissão seja feita com maior alcance.

## Relação S/N Versus B

A largura de banda  $B$  e a potência do sinal  $S$  são intercambiáveis, para efeito de transmissão da informação. Geralmente, nos referimos à potência  $S$  do sinal na entrada do receptor, e à largura de banda  $B$  do sinal que chega ao sistema. Assim, se por um motivo ou outro a intenção é reduzir  $B$ , é possível aumentar  $S$  para compensar a redução de  $B$ , ou se a intenção é reduzir  $S$ , é possível aumentar  $B$  para compensar a redução de  $S$ , mantendo a mesma taxa de transmissão de informação. Naturalmente, esse intercâmbio tem um custo. Geralmente, é necessária a troca do sistema de transmissão.

A definição dos valores de  $S$  e  $B$  depende de vários fatores, desde limitações físicas até limitações de ordem econômica. De um modo geral, sempre se busca utilizar o menor valor de  $B$ , e a menor potência  $S$ , pois isto permitirá que um número maior de sinais partilhe dos mesmos recursos de transmissão.

Entretanto, a complexidade dos sistemas aumenta, ao tentarmos reduzir ambos os valores  $S$  e  $B$ . É algo conflitante a redução simultânea de  $S$  e  $B$ . Pode-se dizer que esta é uma busca permanente para o pesquisador de telecomunicações, obterem sistemas ou processos que consigam atingir um rendimento cada vez maior.

Um parâmetro muito utilizado para avaliação da qualidade de um canal é a relação sinal/ruído  $S/N$  na saída do canal, ou na entrada de recepção (relação sinal/ruído indica a potência do sinal dividida pela potência do ruído). Apesar de ser um parâmetro que depende também de  $B$ , pois que  $N$  (potência de ruído) em muitos casos é proporcional a largura de banda  $W$  ( $W=B$ ) na entrada do sistema, é costume trabalhar com  $S/N$ , ao invés de  $S$ . Portanto podemos dizer que  $S/N$  e  $B$  são intercambiáveis.

A relação entre um fator de expansão de banda e a relação  $S/N$  é exponencial. Assim, se uma dada taxa de transmissão de informação requer uma largura de banda  $B_1$  e uma relação  $(S/N)_1$ , é possível transmitir a mesma taxa de informação sobre um canal com uma largura de banda  $B_2$  e uma relação  $(S/N)_2$  desde que obedecida à relação mostrada na Figura 1-13.

Assim, se dobrarmos a largura de banda do canal, a relação  $S/N$  requerida é a raiz quadrada da anterior, ou se triplicarmos a largura de banda, a relação se reduz para a raiz cúbica da anterior.

Assim, um pequeno aumento relativo na largura de banda  $B$  compra uma grande

redução na relação  $S/N$  requerida. Já um grande aumento na relação  $S/N$  permite uma redução marginal na largura de banda  $B$ .

Portanto, na prática, o intercâmbio entre  $B$  e  $S/N$  é no sentido de aumentar  $B$  e reduzir  $S/N$ , e não no sentido oposto, quando possível.

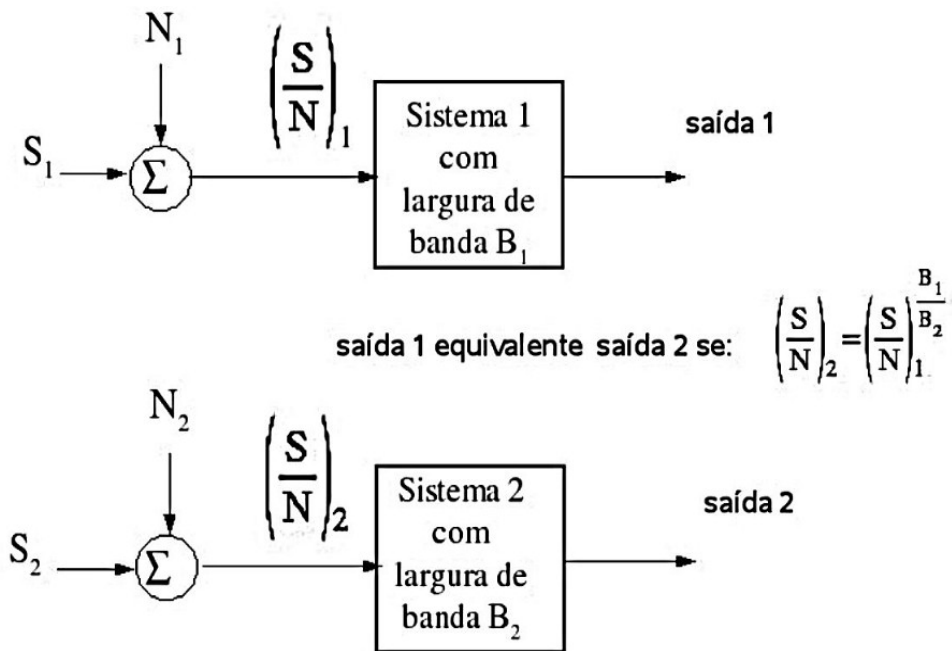


Figura 1-13

Na Figura 1-13, o sistema 1 é equivalente ao sistema 2 no sentido de poderem fornecer a mesma quantidade de informação com a mesma qualidade ao usuário final, a um custo compatível com as necessidades do usuário.

Shannon, através da teoria da informação<sup>2</sup>, demonstra que teoricamente é impossível atingir, simultaneamente, para uma certa relação  $S/N$ , qualquer largura de banda que se deseje.

Na verdade, quanto menor for a relação sinal ruído, maior a largura de banda mínima necessária para que se consiga uma certa capacidade de transmissão de informação. Isto vale tanto para sistemas analógicos quanto para sistemas digitais. Se a relação  $S/N$  for expressa em termos da energia média por bit transmitido,

<sup>2</sup> Os fundamentos da Teoria da Informação foram estabelecidos por Shannon em 1948, através da publicação do artigo SHANNON, C., E., Mathematical Theory of Communications. *Bell Systems Technical Journal*, v. 27, pp. 379-423, jul. 1948; pp. 623-656, out. 1948.

sendo que a unidade de informação é 1 (um) bit, e não da potência média  $S$  do sinal recebido, Shannon demonstra que existe um limite para a relação  $E_b/N_0$ , onde  $E_b$  representa a energia de bit e  $N_0$  a densidade espectral de potência do ruído, abaixo do qual a largura de banda torna-se infinita, por mais complexo que seja o sistema. Este valor de  $E_b/N_0$  é conhecido como o limite de Shannon, e vale -1,59 dB.

Felizmente, nos sistemas práticos atuais, a relação  $E_b/N_0$  é bem maior que o limite de Shannon situando-se de 7 a 20 dB, de modo que já temos ao nosso dispor diversas tecnologias que podem ser empregadas.

De um modo ou de outro, a relação custo/benefício tem que ser avaliada ao se planejar seja uma troca de sistema ou uma modificação nos parâmetros de transmissão. A consideração de aspectos legislativos é também importante.

## Sinal de Banda Básica

Significa um sinal cujas características originadas pela fonte ainda não sofreu qualquer processo que modifique sua forma de onda ou espectro de frequências. Observe que o conceito de fonte é aqui usado de uma forma geral e recorrente, podendo significar inclusive um outro sistema anterior, que gera o sinal de entrada a ser processado pelo sistema sendo analisado.

O espectro de frequências, a Largura de Banda (LB) e a potência média são parâmetros importantes do sinal de Banda Básica (BB), pois representam características fundamentais do sinal que geralmente é aplicado na entrada de um certo sistema.

Geralmente, os instrumentos de medida tentam reproduzir essas características de um sinal que será aplicado à um determinado sistema, para fins de testes de verificação de desempenho ou ajuste e alinhamento do sistema.

## Modulação

Significa a realização de um processo pelo qual as características do sinal de BB (Banda Básica) são modificadas, com a finalidade principal de melhor adaptá-lo ao canal disponível para transmissão.

Geralmente, o processo de modulação envolve mudança nas características do espectro e da forma de onda do sinal de BB.

Com a modulação ocorrem 2 fatos principais:

1-Adaptação do sinal de BB ao meio de transmissão

2-Transmissão simultânea de vários sinais BB no mesmo meio de transmissão sem interferências entre eles, ou multiplexação.

Como exemplo representativo do 1º item tem o caso da radiodifusão e da tele difusão comercial, onde o espaço livre é utilizado para a propagação da informação, ou sinal útil.

Isto é feito utilizando-se antenas irradiantes da energia eletromagnética derivada do sinal elétrico gerado pelos transmissores.

O sinal a ser transmitido é um sinal com B em frequências baixas, que não são adequadas para a irradiação pelas antenas utilizadas. Em sistemas de rádio AM, por exemplo, o sinal útil a ser transmitido (o sinal de banda básica, que entra no modulador) tem frequências que vão de 300Hz a 5kHz, com energia significativa em torno de 800Hz, constituindo um B nominal de 5kHz. As antenas utilizadas irradiam, para a faixa de AM, em frequências que vão de 540kHz a 1700kHz, por imposições históricas, técnicas e legais.

A largura de banda do sinal irradiado, por razões teóricas, é o dobro da banda do sinal útil a ser transmitido, o sinal modulante. Portanto, cada estação ocupa uma banda  $B=10\text{kHz}$ .

Assim, o processo de modulação desloca o espectro do sinal útil, que tem energia significativa em baixas frequências, para faixas mais altas, em torno da frequência da portadora a ser irradiada pela antena, na faixa de RF (rádio frequências na faixa de AM). No receptor deve ser realizado o processo inverso, isto é, a faixa de frequências do sinal recebido deve ser recolocada na faixa original, pelo processo de demodulação.

Portanto, o espectro do sinal de banda básica precisa ser deslocado do valor original, de 300Hz à 5kHz, para outra faixa dentro do intervalo requerido pelas

condições de propagação desejadas.

A modulação provê a forma de realização deste deslocamento espectral.

Como exemplo representativo do 2º item, observamos que diversas emissoras transmitem simultaneamente em uma mesma localidade, no entanto cada rádio receptor consegue sintonizar uma de cada vez, conforme desejado pelo ouvinte.

Isto é possível por que cada emissora ocupa uma faixa diferente de frequências no espectro. O processo de modulação empregado em cada uma das emissoras desloca a banda básica, que ocupa a mesma faixa de 300Hz à 5kHz, em todas elas, para diferentes regiões do espectro, as quais não se sobrepõem para as diversas emissoras, permitindo assim a separação espectral no receptor, no processo vulgarmente chamado sintonia.

## **Modulação Analógica versus Modulação Digital**

A modulação, tal como definida no item anterior, envolve dois processos básicos, um na transmissão, onde o sinal de banda básica é processado pelo modulador para ser enviado ao meio de transmissão, e outro na recepção, onde o sinal modulado recebido do meio de transmissão, enfraquecido, distorcido e com ruído adicionado é demodulado, para recuperar a informação que estava contida na banda básica na entrada do modulador.

A Figura 1-14 ilustra a diferença entre a modulação digital e analógica, apresentando como exemplo a transmissão de um sinal de televisão. A fonte e o destino são os mesmos, porém os processos envolvidos são diferentes em cada caso.

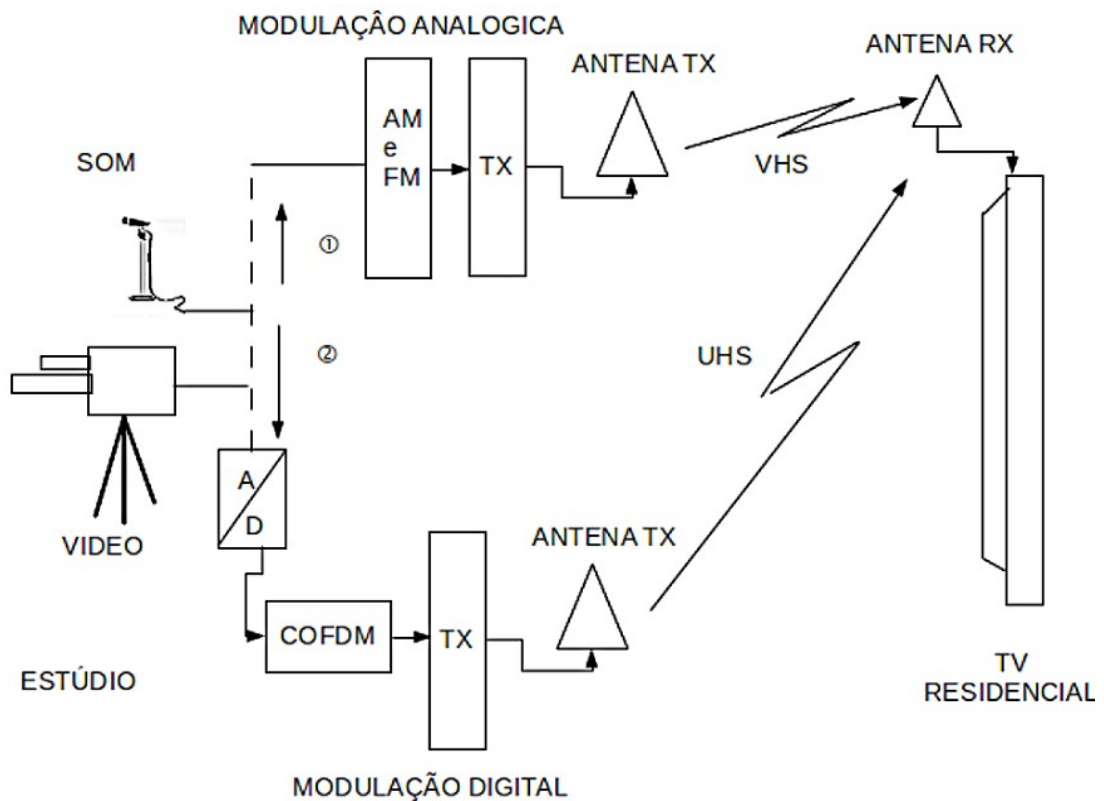


Figura1-14

A modulação analógica normalmente utiliza AM-VSB para a transmissão do sinal de vídeo, e FM para a transmissão de som. São técnicas já consagradas, utilizadas mundialmente.

Observe que a banda básica é um sinal analógico por natureza, onde estão embutidas diversas informações, como o vídeo, áudio, sincronismo, crominância, etc, necessárias ao receptor de TV. A transmissão é feita em VHF<sup>3</sup>. Uma breve descrição destes tipos de modulação será feita posteriormente. O sinal assim gerado e propagado pela antena da tx da emissora é analógico.

A transmissão digital utiliza a mesma fonte, mas em princípio realiza uma conversão A/D nos sinais de som e imagem (essa conversão A/D não é o mesmo PCM utilizado em telefonia fixa, mas obedece aos mesmos princípios de conservação da informação – em resumo transforma uma forma de onda analógica

<sup>3</sup> VHF é a sigla de “Very High Frequency” uma banda de frequências de transmissão. A definição completa das bandas pode ser encontrada no site [http://en.wikipedia.org/wiki/Radio\\_spectrum](http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_spectrum). A banda de VHF vai de 30 a 300 Mhz.

em uma sequência de bits codificados) gerando uma banda básica digital, incluindo sincronismo, cromaticidade, etc. Esta banda básica tem uma forma particular, mas é formada por símbolos de um alfabeto finito. Fica claro que para representar fisicamente esses símbolos são empregados alguma forma de sinal elétrico, geralmente pulsos de tensão.

Existem vários tipos de modulação digital. O meio de transmissão, a existência de distorções e ruídos, as características de propagação, o alcance desejado, as facilidades e recursos a serem alcançados, tudo isso influi na técnica de modulação.

Para a transmissão de TV, esses requisitos impuseram o desenvolvimento de novos sistemas e métodos. Esses desenvolvimentos ocorreram nas principais companhias no mundo, com resultados diversos quanto à técnica e frequências a serem utilizadas<sup>4</sup>.

No Brasil, foi criado o padrão ISDB-TB desenvolvido para a TV aberta a partir do modelo japonês<sup>5</sup>.

Este sistema utiliza um tipo avançado de modulação digital denominado COFDM (OFDM Codificado)<sup>6</sup>, capaz de satisfazer as exigências de qualidade para o padrão.

Portanto, a diferença básica entre a modulação digital e a modulação analógica é o tratamento dado ao sinal de banda básica, que no caso digital constitui-se de uma sequência de símbolos codificados a partir de um alfabeto finito, e no caso analógico constitui-se em uma forma de onda. É claro que em termos físicos, ao final das contas, tudo se resume numa forma de onda.

Portanto, a rigor, toda modulação é analógica. Porém, no caso digital, a forma de onda que representa cada símbolo (um pulso de tensão, por exemplo), pode ser bastante distorcida e modificada pelo ruído do meio de transmissão, e ainda assim ser reconhecida pelo receptor como um símbolo válido.

No caso analógico, a distorção e o ruído induzidos na forma de onda têm que ser minimizados durante a transmissão, pois uma vez adicionados à forma de onda é impossível retirá-los na recepção (na transmissão de símbolos digitais, conhecemos à priori, na recepção, o alfabeto de símbolos a serem transmitidos, enquanto na

<sup>4</sup> Ver [http://pt.wikipedia.org/wiki/Televis%C3%A3o\\_digital](http://pt.wikipedia.org/wiki/Televis%C3%A3o_digital) e [http://pt.wikipedia.org/wiki/Anexo:Lista\\_de\\_canais\\_da\\_televis%C3%A3o\\_digital\\_brasileira](http://pt.wikipedia.org/wiki/Anexo:Lista_de_canais_da_televis%C3%A3o_digital_brasileira)

<sup>5</sup> Ver [http://pt.wikipedia.org/wiki/Televis%C3%A3o\\_digital\\_no\\_Brasil](http://pt.wikipedia.org/wiki/Televis%C3%A3o_digital_no_Brasil)

<sup>6</sup> Para quem se interessar, ver <http://www.digitalradiotech.co.uk/cofdm.htm> , <http://pt.wikipedia.org/wiki/OFDM> e [http://www.bbc.co.uk/rd/pubs/papers/paper\\_15/paper\\_15.shtml](http://www.bbc.co.uk/rd/pubs/papers/paper_15/paper_15.shtml)

transmissão analógica a forma de onda exata a ser recebida é sempre desconhecida).

Assim, uma modulação analógica tem que manter, normalmente, relações S/N superiores à de uma modulação digital, para o mesmo alcance de transmissão e com a mesma qualidade.

No exemplo da Figura 1-14 não está mostrado a parte de recepção, embutida no receptor de TV, que também é diferente em cada caso.

A modulação, pelo fato de ser digital não iria mudar a banda básica compatível com a modulação analógica de TV. Esta banda básica irá se modificar, mas sim em função dos novos padrões a serem adotados para o serviço de TV (como a alta definição, a mudança na relação de aspecto de 3:4 para 9:16, a interatividade, a qualidade do som, etc)

## **Características Gerais da Modulação**

A modulação é uma operação que ocorre em praticamente todo sistema de transmissão, assumindo as mais diversas formas. Não devemos esquecer que quando falamos em transmissão estamos também falando em recepção, e quando falamos em processo de modulação é implícito o processo de demodulação. Não existe um processo sem o outro. Alias, a recepção e a demodulação são importantíssimos para o desempenho do sistema, pois grande parte da compensação da distorção e imunização do ruído são funções do receptor.

Assim, cabe ao receptor a tarefa de reconstituição do sinal e extração da informação com o mínimo de erros. Por vício de linguagem, geralmente esquecemos que a recepção é integrada à transmissão, assim como a demodulação ao processo

de modulação correspondente.

A ideia básica da modulação é transportar o sinal de banda básica (sinal modulante) através do meio de transmissão disponível<sup>7</sup> por determinadas características de um outro sinal, chamado portadora, mais apropriado à transmissão pelo meio disponível do que o sinal modulante.

Na recepção, realiza-se a demodulação, buscando-se recuperar a informação contida no sinal de banda básica (sinal modulante) que foi transportada através do meio disponível pela portadora.

Em realidade, esta operação de transporte gera um sinal modulado, para ser enviado ao meio de transmissão disponível pelo modulador, equipamento que realiza fisicamente a modulação. Mas sempre se busca uma maior facilidade de transmissão da informação, em função das condições oferecidas pelo meio.

As características da portadora a ser utilizada para o transporte da informação variam. Geralmente, a portadora é um único sinal elétrico senoidal, mas pode ser também um sinal retangular multinível, um pulso ótico, ou mesmo uma composição de várias portadoras senoidais.

Quando a modulação é analógica e a portadora é um único sinal elétrico senoidal, é usual a utilização de parâmetros típicos deste sinal para o transporte da informação, ou mesmo uma combinação deles. Os parâmetros típicos são a amplitude  $A$ , a frequência  $f_0$  e a fase relativa  $\theta$ . Obtemos então genericamente uma modulação em amplitude AM, uma modulação em frequência FM e uma modulação em fase PM.

### **Um Pouco de História**

Historicamente, os sinais modulados em amplitude por uma banda básica analógica foram os primeiro a serem gerados, com a finalidade de transmissão radiofônica. Conforme citado por Wikipedia, no site [http://pt.wikipedia.org/wiki/Rádio\\_AM](http://pt.wikipedia.org/wiki/Rádio_AM), "*No Brasil as primeiras transmissões AM surgiram com a emissora de Roquette-Pinto, que em 1923 fundou a Rádio Sociedade do Rio de Janeiro. Em 1936 a rádio transformou-se em Rádio Ministério da Educação, que propaga o ensino à distância.*"

---

<sup>7</sup> O meio de transmissão disponível pode ser um cabo de fios de pares metálicos, uma fibra ótica, um enlace de micro-ondas, um enlace satélite, a propagação omni direcional no espaço livre, um cabo coaxial, um guia de ondas, um cabo submarino etc. Maiores informações sobre meios de transmissão pode ser obtida em uma busca na Internet.

*As frequências AM foram fundamentais na vida do brasileiro em meados do [século XX](#). As rádios de longo alcance, como a Rádio Nacional do Rio de Janeiro, a Super Rádio Tupi e a Rádio Record, que atingiam quase 100% do território nacional ajudaram a propagar os times cariocas e paulistas de futebol por todo o Brasil."*

Até hoje as estações de rádio com modulação analógica AM continuam a propagar o seu sinal a milhões de ouvintes brasileiros.

A tecnologia mudou muito, as válvulas deram lugar aos transistores, e esses aos chips e circuitos integrados. Os aparelhos receptores, que há 50 ou 60 anos atrás eram enormes, específicos para a função de rádio receptor, cabem hoje num único chip e estão integrados a celulares, laptops, notebooks, etc.

Essa multiplicidade toda, entretanto, agiu de modo benéfico ao serviço de radiofonia, estimulando sua atividade.

Apesar do avanço tecnológico observado, seus princípios técnicos básicos não mudaram. Os modelos matemáticos aplicáveis à análise de sinais modulados continuam válidos e ainda são utilizados para o desenvolvimento, operação e manutenção dos sistemas.

Mas esta é uma outra história, que veremos em outros volumes desta série.