

Nota de aula: Sistemas de Comunicações Móveis

Capítulo 1 – Sinais e modelo de sistemas de comunicações

Este capítulo oferece uma visão abrangente dos fundamentos dos sistemas de comunicações móveis, abordando desde a transmissão de mensagens e informações até os complexos processos de conversão e transdução de sinais. Ele começa diferenciando a mensagem, a manifestação tangível da informação, da própria informação, que é o conteúdo ou significado contido na mensagem. A importância dos transdutores é destacada como elementos chave que convertem informações em sinais elétricos para transmissão e recepção eficientes.

O texto aprofunda na explicação de como os sinais são representados tanto no domínio do tempo quanto no da frequência, uma distinção crucial para o entendimento de como as informações são processadas. O sinal de voz é apresentado como um exemplo primário.

O documento também detalha o impacto das limitações fundamentais dos canais de comunicação, como largura de banda e ruído, e a forma como elas afetam a capacidade do canal. A modelagem de canais, especialmente em contextos móveis, é sublinhada como essencial para a concepção de sistemas de transmissão eficientes e confiáveis. Nesse contexto, o texto descreve os codificadores de fonte e de canal, o modulador e o módulo de RF como componentes cruciais do transmissor, fundamentais para o ajuste da mensagem para transmissão eficiente e para superar desafios como atenuação e interferência.

Palavras-chave: Sistemas de Comunicação Móveis, Transdutores, Sinais Contínuos e Discretos, Sinal de Voz, Espectro Sonoro, Modulação por Código de Pulso (PCM), Modulador, Módulo de RF, Resposta de Frequência do Canal, Largura de Banda, Relação Sinal-Ruído.

1.1 Introdução

O conceito de informações e mensagens é fundamental para entender a dinâmica dos sistemas de comunicação. A mensagem pode ser considerada como a manifestação física da informação, sendo produzida por uma fonte com o propósito de ser transmitida a um receptor. Esta informação pode assumir diversas formas, como som, imagem, texto ou dados, dependendo do meio de comunicação utilizado.

1.1.1 Objetivo de sistemas de comunicações, mensagem e informação

O principal objetivo de qualquer sistema de comunicação é a reprodução fiel da mensagem no destino, de forma que o receptor perceba uma réplica aceitável da mensagem original gerada pela fonte. Isso implica não apenas na transmissão eficaz da mensagem através do canal de comunicação, mas também na preservação da integridade da informação contida na mensagem, minimizando perdas e distorções.

Na telefonia móvel, a voz é captada por um microfone (um tipo de transdutor), convertida em sinais elétricos (dados digitais), transmitida através da rede de comunicação, e finalmente convertida de volta em ondas sonoras pelo alto-falante do dispositivo receptor. O objetivo é que a voz recebida soe clara e compreensível, o mais próximo possível da voz originalmente transmitida, apesar da complexa cadeia de conversões e transmissão envolvida.

É necessário distinguir mensagem de informação.

Mensagem é a expressão tangível da informação. Por exemplo, uma mensagem pode ser um e-mail enviado por um usuário, a voz de uma pessoa transmitida durante uma chamada telefônica, ou mesmo um vídeo compartilhado em uma plataforma de mídia social. Em cada caso, a mensagem é o veículo que carrega a informação da fonte até o destinatário.

Informação refere-se ao conteúdo ou significado contido na mensagem. A informação é o que a fonte deseja comunicar ao receptor, sendo a mensagem a sua representação física ou digital.

1.1.2 Transdutores e Sinais Elétricos

Transdutores desempenham um papel crucial nesse processo, atuando como a interface que converte a informação de sua forma original para um sinal elétrico que pode ser facilmente manipulado, transmitido e, eventualmente, convertido de volta à sua forma original ou a uma forma utilizável pelo receptor.

Os transdutores são, portanto, essenciais para a transformação de mensagens do domínio físico (como som e luz) para o domínio elétrico e vice-versa. Exemplos incluem microfones (que convertem ondas sonoras em sinais elétricos) e câmeras digitais (que convertem imagens visuais em dados digitais).

A interação entre mensagens, informação, sistemas de comunicação e transdutores ilustra a complexidade e a sofisticação dos mecanismos através dos quais nos comunicamos diariamente. Seja em uma conversa telefônica, navegando na internet ou assistindo à televisão, estamos constantemente envolvidos em processos que transformam e transmitem informações de formas inimagináveis há apenas algumas décadas.

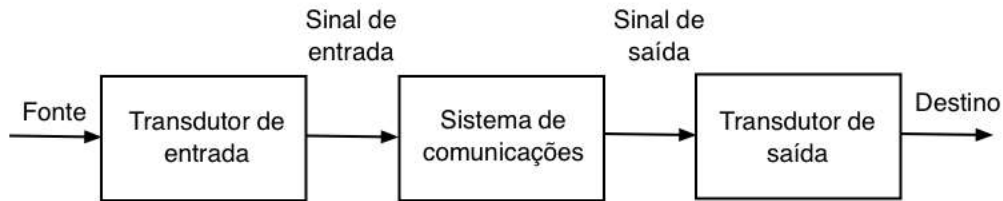


Figura 1 – Visão geral do sistema de comunicações desde a fonte ao destino

1.1.3 Representação dos sinais no domínio do tempo e da frequência. Sinais contínuos e discretos.

Antes de prosseguirmos, é importante estabelecer uma base sólida sobre alguns conceitos preliminares essenciais em sistemas de comunicações. A representação de um sinal no domínio do tempo e da frequência, bem como a distinção entre sinais contínuos e discretos, são fundamentais para a compreensão de como as informações são processadas e transmitidas.

Quando falamos sobre a representação de um sinal no domínio do tempo, estamos nos referindo à maneira como esse sinal varia ao longo do tempo. Essa é uma forma intuitiva de visualizar o sinal, pois mostra como o valor do sinal muda em cada instante. A representação no domínio do tempo é particularmente útil para entender a dinâmica temporal do sinal, como a sua amplitude em momentos específicos.

A frequência, medida em *hertz* (ciclos por segundo), é um conceito-chave, pois indica a taxa de variação do sinal com o tempo, permitindo-nos compreender e manipular os sinais de maneira mais eficaz para diversas aplicações de comunicação. A representação no domínio da frequência decompõe o sinal em seus componentes de frequência, mostrando como a energia do sinal está distribuída pelas diversas frequências. Isso é crucial para analisar o comportamento cíclico de um sinal, identificar suas frequências dominantes e compreender como o sinal interage com sistemas que têm resposta em frequência variada. Ao transformar o sinal para o domínio da frequência, podemos ver claramente os componentes que compõem o sinal original, o que é muitas vezes não tão evidente na visualização no domínio do tempo.

A distinção entre sinais contínuos e discretos é um conceito fundamental no estudo do processamento de sinais. Sinais contínuos são aqueles que apresentam valores em cada ponto do tempo, sem interrupções ou descontinuidades. Além disso, é importante destacar que, em um sinal contínuo, seja no domínio da variável do tempo, seja no domínio da variável que representa o valor do sinal, é sempre possível definir um valor intermediário entre quaisquer dois valores dados. Isso significa que, para qualquer par de pontos, sempre

podemos encontrar um valor que esteja entre eles, refletindo a natureza contínua desses sinais tanto em amplitude quanto em tempo.

Por outro lado, sinais discretos consistem em valores definidos apenas em pontos de tempo específicos e separados. Em outras palavras, os sinais discretos têm valores definidos apenas em intervalos de tempo distintos, sem que haja a necessidade ou possibilidade de se definir valores intermediários entre esses pontos. Esta característica dos sinais discretos destaca a natureza não contínua tanto do domínio do tempo quanto do domínio da amplitude, onde os valores do sinal são conhecidos ou definidos apenas em pontos específicos.

A capacidade de distinguir entre esses dois tipos de sinais é crucial para o processamento de sinais, influenciando diretamente a escolha de técnicas de análise e síntese apropriadas para cada tipo de sinal. No processamento de sinais digitais, por exemplo, a discretização é uma etapa essencial que transforma sinais contínuos em sinais discretos, permitindo seu processamento por dispositivos digitais. Este processo envolve não apenas a amostragem do sinal no tempo, mas também a quantização de sua amplitude, adaptando o sinal para o ambiente digital.

Assim, entender a natureza contínua e discreta dos sinais é fundamental para a aplicação correta das metodologias de processamento de sinais, influenciando desde a forma como capturamos e representamos informações até a maneira como as analisamos e as utilizamos em aplicações práticas.

1.1.4 Sinal de voz

No contexto das comunicações, o sinal de voz serve como um excelente exemplo para ilustrar a importância desses conceitos. A voz humana, quando captada por um microfone, pode ser considerada um sinal contínuo no domínio do tempo. No entanto, para que possa ser transmitida digitalmente ou processada por dispositivos eletrônicos, muitas vezes é convertida em um sinal discreto através de processos como a amostragem e a quantização. Além disso, analisar a voz no domínio da frequência pode revelar características únicas, como o timbre da voz ou a presença de certas frequências que distinguem uma voz de outra. A frequência permitindo-nos compreender e manipular os sinais de maneira mais eficaz para diversas aplicações de comunicação.

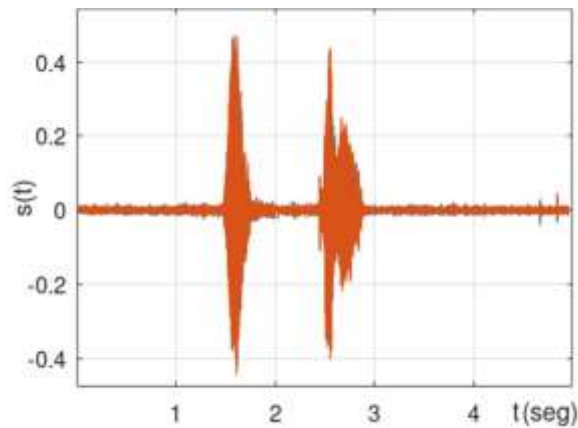


Figura 2 – Representação do sinal de voz no domínio do tempo, janela de observação de 5 segundos.

O espectro de voz é uma característica fascinante da comunicação humana e da engenharia de áudio, abrangendo uma ampla faixa de frequências que cada uma desempenha um papel específico na produção e na percepção do som. A análise espectral da voz nos ajuda a entender melhor como diferentes componentes de frequência contribuem para a qualidade e inteligibilidade da fala.

A faixa típica do sinal de voz no domínio da frequência se situa entre 10 Hz e 3400 Hz. Apesar dessa faixa definida, é importante notar que o espectro de voz não é estritamente limitado, pois existem componentes que se estendem além desses limites, embora com menor intensidade. A maior parte da energia do sinal de voz se concentra na faixa entre 500 Hz e 800 Hz, uma região crucial para a compreensão da fala humana. Para aplicações em telefonia, a frequência de amostragem adotada internacionalmente é de 8 kHz, o que permite uma reprodução fiel das nuances da voz dentro da faixa de frequência mais relevante.

A técnica da Transformada de Fourier é amplamente utilizada na análise espectral, permitindo a decomposição de sinais de tempo em seus componentes de frequência. Isso é particularmente útil para identificar as características fundamentais do sinal de voz e entender como o ruído ou outros sinais podem interferir ou mascarar esses componentes.

Além da voz humana, a análise espectral se aplica a uma variedade de sons, desde os subgraves, sentidos mais do que ouvidos, até os agudos, que informam o timbre geral de uma gravação sem necessariamente contribuir para a tonalidade. O tratamento cuidadoso das frequências pode realçar ou diminuir certos aspectos da voz, influenciando diretamente a clareza e a qualidade percebida do som.

Esses *insights* sobre o espectro de voz e a análise espectral fornecem uma base valiosa para profissionais em áreas como engenharia de áudio, design de sistemas de comunicação e ciências da fala, ajudando a otimizar tecnologias e técnicas para melhorar a comunicação e a experiência auditiva.

Um conjunto de aplicações que permitem compreender melhor o comportamento do sinal de voz está disponível em <https://bit.ly/3Tpmhli>.

1.1.5 O espectro sonoro

Ao explorarmos o espectro sonoro, identificamos diversas faixas de frequência que desempenham papéis fundamentais não só em comunicações, mas também em contextos musicais e médicos. Essas faixas, com suas características e aplicações únicas, influenciam a produção, transmissão e percepção de sinais em vários domínios.

O espectro sonoro, que varia de frequências baixas percebidas pelo ouvido humano, em torno de 20 Hz, até as mais altas, aproximadamente 20 kHz, inclui:

- **Baixas Frequências (20 Hz - 250 Hz):** Frequências graves, típicas de instrumentos como o contrabaixo e a tuba, relevantes tanto pela sensação auditiva quanto pela vibração física que produzem. Essas frequências encontram uso em sistemas de som que visam uma experiência auditiva completa, incluindo sensações táteis.
- **Médias Frequências (250 Hz - 2 kHz):** Cruciais para a compreensão da fala humana, essa faixa contém as frequências fundamentais das vozes humanas, abrangendo tenores, barítonos e contraltos. Instrumentos musicais, em sua grande maioria, também operam significativamente dentro desta faixa, harmonizando e melodiando as composições. Essas características tornam a faixa média essencial para aplicações de comunicação como transmissões de rádio FM e broadcasting de TV, onde a clareza da fala e a riqueza musical são prioritárias.
- **Altas Frequências (2 kHz - 20 kHz):** Envolvem sons agudos e são importantes para a clareza da fala e o brilho da música. Instrumentos como flautas e certos tipos de sinos manifestam-se predominantemente nesta faixa. Além disso, esta faixa é explorada em tecnologias de compressão de áudio e em sistemas de transmissão que buscam otimizar a qualidade do som mantendo eficiência no uso da largura de banda.

Além disso, tecnologias como o sonar e o ultrassom, operando em frequências acima da faixa audível humana, ilustram aplicações médicas do espectro sonoro. O ultrassom, por exemplo, utiliza frequências entre 2 MHz e 18 MHz para gerar imagens do interior do corpo humano, demonstrando a importância dessas frequências elevadas em diagnósticos e tratamentos médicos.

Portanto, as aplicações das diversas faixas do espectro sonoro se estendem além dos contextos musicais e médicos, abrangendo também o vasto campo das comunicações. Desde a transmissão de música e voz em rádios e TVs até aplicações médicas avançadas, compreender essas faixas e suas propriedades

facilita a inovação e a eficácia em múltiplas áreas, incluindo engenharia, entretenimento e saúde.

Espectro sonoro ^[1]													
Espectros	Silêncio	Infrassom	Som audível						Ultrassom				Hiper-som ^[2]
			Subgrave	Grave	Médias baixas	Médios	Médias altas	Agudo					
Frequência	0	0.001 Hz - 20Hz	20Hz	23Hz	250Hz	640Hz	2,5KHz	20.000 Hz	30.000 Hz	10 ⁵ Hz	10 ⁶ Hz	10 ⁸ Hz	10 ⁹ Hz
Descrição	Ausência de som		faixa da audição humana (perspetivável ao ouvido humano)						frequência típica do sonar	limite da audição de morcegos e golfinhos.	frequência típica de ultrassons para fins médicos.		

Figura 3 – Espectro sonoro

1.1.6 Sinal de vídeo

O sinal de vídeo analógico é essencial nas comunicações, particularmente nas transmissões televisivas e sistemas de videovigilância. A densidade dos pixels e a velocidade de varredura são determinantes para a qualidade do vídeo, afetando diretamente a nitidez e fluidez das imagens. Um pixel, abreviação para *picture element*, é a menor unidade de uma imagem digital exibida em uma tela. Consiste em um ponto que pode exibir uma gama de cores, comumente por meio da combinação das cores básicas vermelho, verde e azul (RGB). A densidade dos pixels em uma tela determina a resolução da imagem, com uma quantidade maior de pixels resultando em imagens mais detalhadas e nítidas.

As tecnologias de TV analógica incluem os padrões NTSC, PAL e SECAM, cada um com características únicas. NTSC, usado principalmente na América do Norte e Japão, opera com 525 linhas e 60 campos por segundo, enquanto PAL e SECAM, predominantes na Europa, Austrália, Ásia e partes da África, possuem 625 linhas e 50 campos por segundo. A principal diferença entre eles reside na precisão e estabilidade da cor, com PAL oferecendo maior precisão de cor em comparação com NTSC, e SECAM utilizando uma transmissão de cor sequencial para maior estabilidade. O entendimento desses padrões é essencial para a produção e distribuição de conteúdo televisivo, especialmente em um contexto globalizado.

Com a evolução para o digital, a compreensão dos fundamentos do vídeo analógico torna-se indispensável, fornecendo base para avanços em compressão e transmissão de vídeo, maximizando a eficiência da largura de banda e aprimorando a qualidade das comunicações digitais.

1.1.7 Representação matemática do sinal no domínio do tempo e da frequência

Vimos que o sinal pode ser representado de duas formas:

Prof. Clayton J A Silva

- Domínio do tempo – Representa o comportamento do sinal elétrico x , que transporta a informação, em função do tempo, t
- Domínio da frequência – Representa o comportamento do sinal elétrico X em função da sua taxa de variação com o tempo ou frequência, f

O sinal elétrico (x) – variável dependente - pode ser descrito em função do tempo (t) – variável independente.

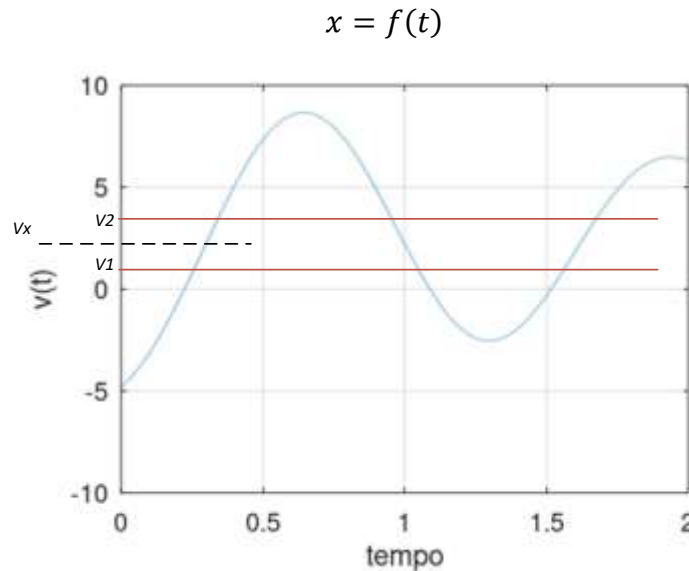


Figura 4 – Variação da amplitude de um sinal, medido em V, com o tempo t , medido em segundos

A velocidade ou taxa da variação do sinal no tempo, medida em *hertz* (Hz), é chamada de frequência. Todo sinal $x(t)$ pode ser representado por uma combinação linear de componentes que representa o seu comportamento espectral, ou seja, das suas componentes em frequência, chamada de Transformada de Fourier

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

, onde $\omega = 2\pi \cdot f$ é a frequência angular

O detalhamento pode ser obtido em <https://bit.ly/3Tpmhli>.

1.1.8 O problema da digitalização

O processo de conversão analógico-digital envolve três etapas principais: amostragem, quantização e codificação. A amostragem é o processo de medir o valor do sinal analógico em intervalos regulares de tempo. A quantização consiste em converter esses valores amostrados em um conjunto finito de valores, o que pode introduzir um erro conhecido como ruído de quantização. Finalmente, a codificação transforma os valores quantizados em uma representação binária.

Este processo é fundamental para permitir que sinais analógicos sejam processados e armazenados por sistemas digitais.

A amostragem

Se o sinal for contínuo no tempo, precisará ser discretizado. A figura apresenta um sinal contínuo e na sequência a sua amostragem em instantes discretos.

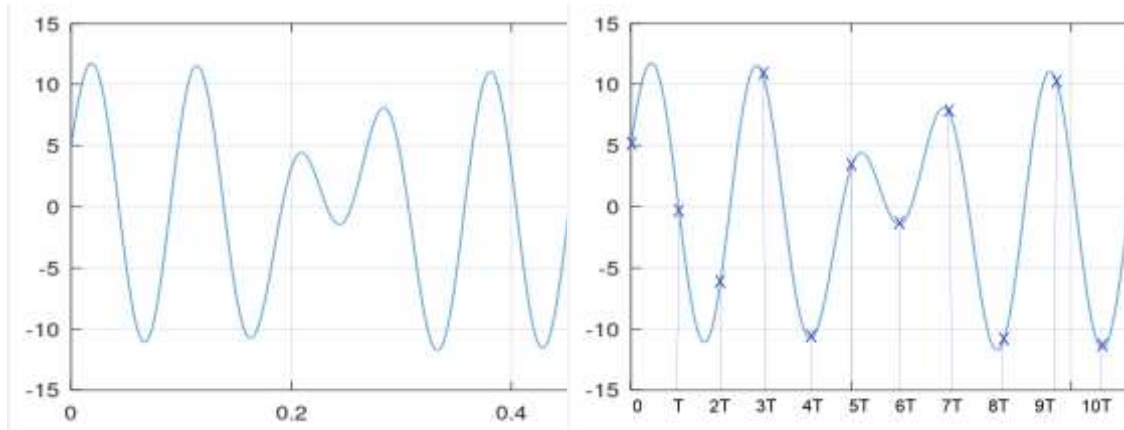


Figura 5 – Sinal analógico amostrado em instantes iguais a T

Para amostrar o sinal pode-se multiplicá-lo por um sinal $\delta_{T_A}(t)$ – onde δ representa delta de Dirac ou função impulso, ou seja, um trem de impulsos, o que resultaria em

$$x(t) \cdot \delta_{T_A}(t)$$

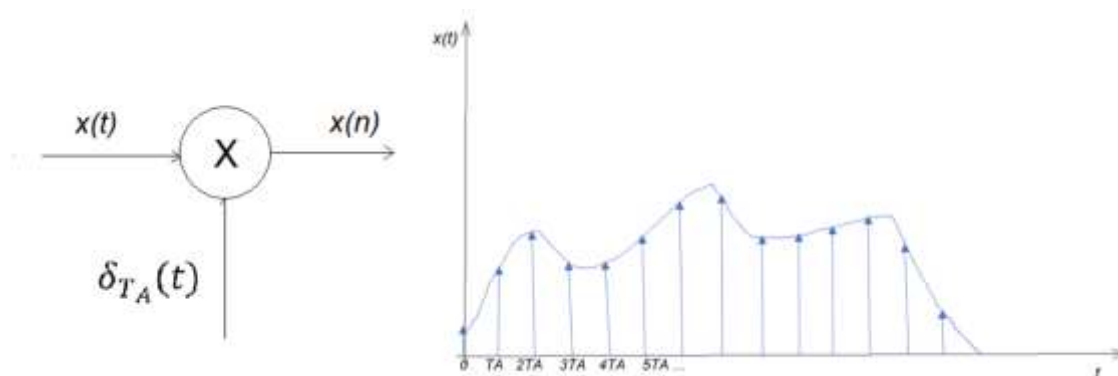


Figura 6 – Amostragem de um sinal analógico $x(t)$ com período de amostragem T_A

A imagem mostra o processo de amostragem de um sinal contínuo no tempo $x(t)$ usando uma função impulso deslocada no tempo, representada por $\delta(t)$. O resultado da amostragem é um sinal discreto $x(n)$, onde n é um índice inteiro T_A é o intervalo de amostragem ou período de amostragem.

O sinal amostrado pode ser representado como um vetor $x(n)$, $n = 0$ a M , tal que $t = n \cdot T_A$.

$$x(n) = [x(0), x(1), \dots, x(M)]$$

O fenômeno de *aliasing* ocorre quando um sinal contínuo é amostrado a uma taxa que é insuficiente para capturar a variação do sinal. Segundo o Teorema de Amostragem de Nyquist-Shannon, um sinal deve ser amostrado a uma taxa maior que o dobro da sua frequência máxima para que seja possível reconstruir o sinal original a partir de suas amostras sem perda de informação.

$$f_A > 2f_{m\acute{a}x}$$

Quando a taxa de amostragem é menor que o dobro da frequência máxima do sinal (a taxa de *Nyquist*), as frequências mais altas do sinal podem ser interpretadas como se fossem frequências mais baixas. Isso acontece porque as amostras são indistinguíveis de um sinal de frequência mais baixa; as ondas de alta frequência se "disfarçam" como ondas de frequência mais baixa, daí o termo *aliasing*.

Se a taxa de amostragem T_A não for suficientemente alta, as amostras podem representar incorretamente o sinal $x(t)$, e qualquer tentativa de reconstruir $x(t)$ a partir de $x(n)$ resultará em um sinal com distorções. Essas distorções são o *aliasing*.

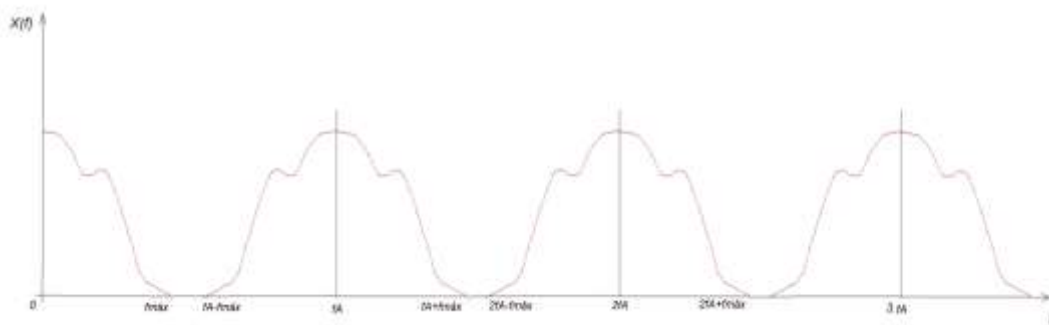


Figura 7 – Comportamento do sinal amostrado no domínio da frequência, antes da aplicação do filtro anti-aliasing

Para evitar o *aliasing*, os engenheiros utilizam um filtro passa-baixa, conhecido como filtro *anti-aliasing*, antes da amostragem para garantir que o sinal não contenha frequências superiores à metade da taxa de amostragem. Dessa forma, o sinal amostrado pode ser reconstruído com precisão a partir de suas amostras.

A quantização

Após o sinal ser amostrado precisa ser quantizado.

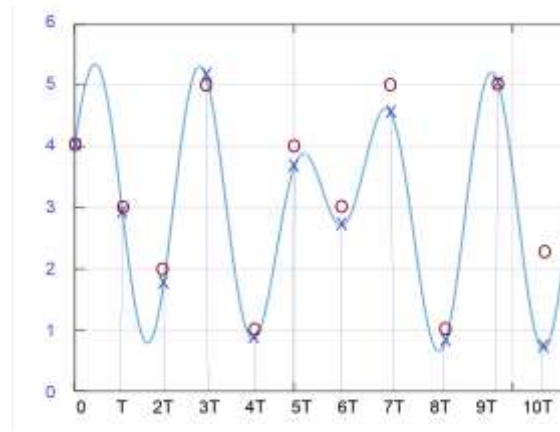


Figura 8 – Sinal $x(t)$ amostrado e quantizado com sete níveis de quantização

A Figura 9 ilustra o processo de quantização de um sinal analógico contínuo $s(t)$ para um sinal digital quantizado $s_q(t)$. A quantização é o processo de mapear um intervalo contínuo de valores em um intervalo discreto (ou finito) de valores. O eixo vertical da figura mostra os níveis de quantização que são possíveis no sistema digital.

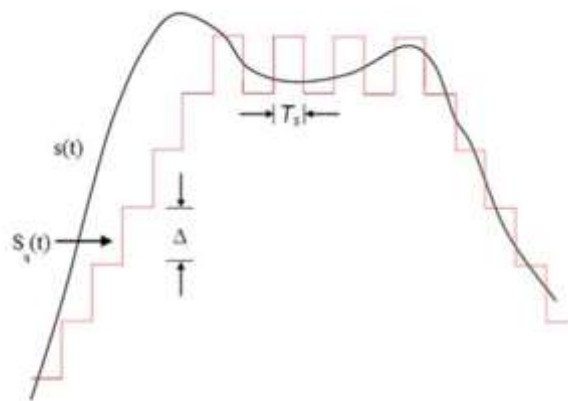


Figura 9 – Degrau de quantização

Durante o processo de quantização, cada amostra do sinal é arredondada para o nível de quantização mais próximo. Isso introduz um erro chamado de erro de quantização, que é a diferença entre o valor real da amostra e o valor quantizado. No gráfico, isso é representado pela distância vertical entre a curva do sinal original $s(t)$ e o sinal quantizado degrau $s_q(t)$. O erro de quantização é simbolizado por Δ .

Dois aspectos importantes a serem observados na quantização são:

- Intervalo de Quantização (Δ): Este é o tamanho do passo entre cada nível de quantização. Um intervalo de quantização menor reduzirá o erro de quantização, mas aumentará o número de bits necessários para representar cada amostra.

- Taxa de Amostragem (T_S ou T_A): Indica a frequência com que o sinal é amostrado antes da quantização.

O erro de quantização é inevitável, mas seu efeito pode ser minimizado utilizando uma maior de níveis de quantização, o que torna o erro de quantização menor em magnitude. No entanto, isso também significa que mais espaço de armazenamento e largura de banda são necessários para armazenar e transmitir o sinal quantizado.

A quantização é um passo crítico no processo de conversão analógico-digital e é uma fonte fundamental de ruído em sistemas digitais, conhecido como ruído de quantização. É importante entender que, embora a quantização permita representar sinais analógicos em um formato digital conveniente, a qualidade da representação depende do número de bits usado e de como o processo é executado.

A função de quantização $q(x)$ é fundamental no processo de digitalização de sinais, onde um sinal contínuo em amplitude é convertido em uma forma que pode ser representada em um sistema digital com um número finito de níveis. Ela é responsável por atribuir a cada amostra do sinal $x(n)$ um valor aproximado que corresponde a um dos níveis discretos disponíveis.

Para determinar a resolução da quantização, primeiramente observamos o valor pico-a-pico do sinal amostrado, que é a diferença entre os valores máximo e mínimo do sinal, dado por

$$x_{pp} = x(n)_{max} - x(n)_{min}.$$

Esta medida nos dá a faixa dinâmica do sinal, que é o intervalo total de valores que o sinal pode assumir.

Quando dividimos esta faixa dinâmica em L níveis de quantização, criamos degraus de quantização (Δ), de modo que cada amostra do sinal será arredondada para o nível de quantização mais próximo. O degrau de quantização é calculado pela fórmula

$$\Delta = x_{pp}/(L - 1)$$

, garantindo que todo o intervalo de valores seja coberto pelos níveis de quantização disponíveis.

A função $q(x)$ irá então mapear cada valor amostrado $x(n)$ para o valor de um destes níveis de quantização. Este processo de mapeamento pode ser realizado através de diferentes estratégias de quantização. Por exemplo, pode-se buscar o menor erro quadrático, onde a soma dos quadrados das diferenças entre os valores amostrados e os valores quantizados é minimizada. Alternativamente,

pode-se utilizar a abordagem de distância mínima, onde cada valor amostrado é mapeado para o nível de quantização mais próximo em termos de valor absoluto.

Nas práticas que consideraremos, utilizaremos a abordagem de distância mínima para a função de quantização. Esta escolha significa que para cada amostra do sinal $x(n)$, procuramos o nível de quantização Li tal que a diferença $|x(n) - Li|$ seja a menor possível, minimizando assim o erro de quantização para aquela amostra específica.

A quantização é um processo que inevitavelmente introduz erro ou ruído de quantização, pois estamos aproximando valores contínuos a uma escala discreta. A qualidade da quantização pode ser melhorada aumentando o número de níveis L , o que diminui o tamanho do degrau Δ e, por consequência, reduz o erro máximo possível. Porém, aumentar L implica em maior uso de memória e largura de banda para armazenar e transmitir o sinal quantizado.

O erro de quantização é a diferença entre o valor do sinal antes de ser quantizado $x(n)$ e o valor após a quantização $q[x(n)]$. Este erro ocorre porque a quantização força o sinal a assumir um dos valores discretos disponíveis, o que raramente será o valor exato do sinal contínuo. Matematicamente, é expresso pela equação

$$d(n) = x(n) - q[x(n)]$$

, onde $d(n)$ representa o erro de quantização para a amostra n .

A relação sinal-ruído de quantização (SQNR) é uma medida que compara o nível de sinal desejado ao nível de ruído introduzido durante a quantização. Em termos gerais, um SQNR alto significa que o nível de ruído é baixo em comparação com o sinal, indicando uma boa qualidade de sinal. Matematicamente, a SQNR é expressa em decibéis (dB) pela fórmula:

$$SQNR = 10 \log \frac{\sum_n x^2(n)}{\sum_n d^2(n)}$$

, onde o numerador é a soma dos quadrados das amostras do sinal original, representando a potência do sinal, enquanto o denominador é a soma dos quadrados dos erros de quantização, representando a potência do ruído de quantização.

É importante analisar as implicações práticas dessas escolhas e como elas afetam a fidelidade do sinal digitalizado em relação ao seu original analógico, assim como o custo-benefício associado a uma maior resolução de quantização.

1.2 Visão Geral do Sistema de Comunicação

A Figura 10 apresentada ilustra um sistema de comunicação típico, dividido em quatro componentes principais: Fonte, Transmissor, Canal de comunicações, e

Receptor, culminando no Destino. Estes sistemas são projetados para transmitir informações, na forma de sinais, de um local para outro.

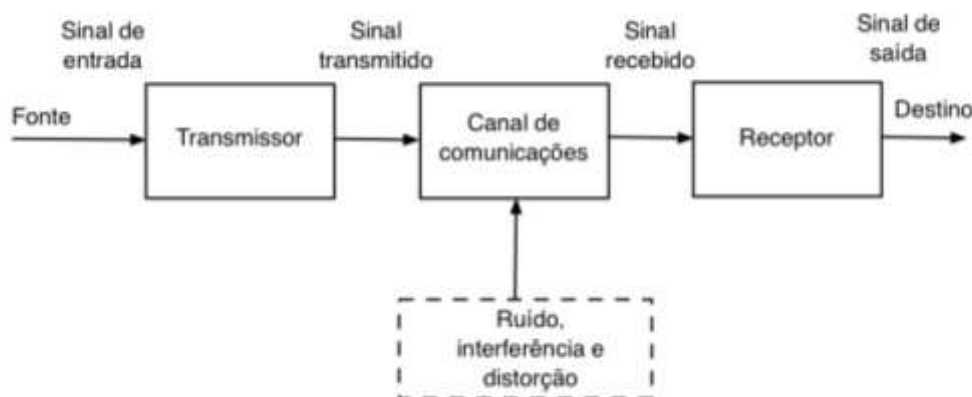


Figura 10 – Modelo geral do sistema de comunicações

1.2.1 Componentes do Sistema de Comunicação

Transmissor

O transmissor tem a função essencial de processar o sinal de entrada, proveniente da fonte, e adaptá-lo para transmissão através do canal. Ele condiciona o sinal para otimizar a eficiência da transmissão e para minimizar os efeitos do canal sobre o sinal. Isso pode incluir a modulação do sinal, a amplificação de sua potência e a aplicação de técnicas de codificação para proteção contra erros.

1.2.2 Canal de Comunicações

O canal de comunicações é o meio pelo qual o sinal é enviado do transmissor ao receptor. Pode ser composto por um par trançado, um cabo coaxial, fibra óptica, ou até mesmo o espaço livre para comunicações sem fio. Cada tipo de canal tem características únicas e pode impor diferentes formas de atenuação, distorção, interferência e ruído ao sinal transmitido.

Efeitos Indesejados no Canal de Comunicações

Os efeitos indesejados que podem afetar o sinal incluem:

- Atenuação: redução da potência do sinal, que pode ocorrer devido à dissipação de energia inerente ao meio de transmissão.
- Distorção: modificações indesejadas nas características do sinal transmitido, muitas vezes resultantes das respostas em frequência não uniformes do canal.

- Interferência: a superposição de sinais estranhos, que podem vir de fontes diversas, como outros sistemas de transmissão ou dispositivos eletrônicos.
- Ruído: engloba todos os sinais elétricos aleatórios e imprevisíveis gerados por fontes naturais e artificiais, que podem adulterar a informação transmitida. O movimento aleatório das cargas elétricas nos condutores e componentes eletrônicos gera correntes ou tensões aleatórias, conhecidas como ruído térmico. O ruído é inevitável e está presente em todos os sistemas de comunicação. O impacto do ruído sobre a transmissão da informação é quantificado pela razão sinal-ruído (S/N), que compara a potência do sinal com a potência do ruído. Uma alta razão sinal-ruído é desejável, pois indica que o sinal é significativamente mais forte do que o ruído. Esta razão é muitas vezes expressa em decibéis (dB), proporcionando uma medida logarítmica que pode ser mais conveniente para análises e comparações.

O receptor opera sobre o sinal recebido, com o objetivo de corrigir as distorções e eliminar o ruído e as interferências o máximo possível. Em seguida, ele prepara o sinal para ser entregue ao transdutor de saída ou ao destino final.

Peculiaridades do Canal Móvel (Canal de RF)

Quando nos referimos a canais móveis, ou canais de Radiofrequência (RF), estamos lidando com um conjunto adicional de desafios. Esses canais são conhecidos pela variação de características devido ao movimento do transmissor, do receptor, ou de ambos, além do ambiente que os cerca. As principais peculiaridades incluem:

- Multipercurso: O sinal pode refletir em objetos, causando múltiplas cópias do sinal que chegam ao receptor em momentos diferentes, o que pode causar interferência construtiva ou destrutiva.
- Desvanecimento: Variações rápidas na amplitude do sinal recebido, causadas pela interferência entre múltiplos caminhos ou pela variação do perfil do canal.
- Doppler: A variação na frequência do sinal recebido causada pelo movimento relativo entre o transmissor e o receptor.
- Sombreamento: Variações de longo prazo na intensidade do sinal causadas por obstruções físicas no ambiente, como edifícios ou montanhas.

O projeto de sistemas de comunicação móvel deve levar em conta esses efeitos para garantir a integridade e a qualidade da informação transmitida. Métodos

como a diversidade de antenas, equalização adaptativa e técnicas de modulação robustas são comumente empregados para mitigar esses problemas.

1.2.3 Resposta de Frequência do Canal de Comunicação

A resposta de frequência ou função de transferência do canal é um conceito fundamental na teoria das comunicações, pois descreve como um sinal é modificado pelo canal durante a transmissão. Ela é representada por $H(f)$ e tem um papel crucial no desenvolvimento de sistemas de transmissão e transmissores eficientes.

Definição Matemática

A função de transferência $H(f)$ está diretamente relacionada ao sinal transmitido $X(f)$ e ao sinal recebido $Y(f)$, sendo matematicamente expressa como:

$$H(f).X(f) = Y(f)$$

A resposta do canal contempla tanto a amplitude quanto a fase do sinal em diferentes frequências. Isso significa que cada componente de frequência do sinal transmitido pode ser atenuada ou amplificada e também sofrer um deslocamento de fase enquanto atravessa o canal.

No domínio do tempo, a função de transferência é representada pela convolução dos sinais:

$$y(t) = x(t) * h(t)$$

onde $h(t)$ é a resposta do canal no domínio do tempo e o operador $*$ denota a convolução.

Computacionalmente, a operação de convolução pode ser complexa, especialmente para sinais contínuos e em tempo real, devido ao alto número de cálculos envolvidos. No entanto, a transformada de Fourier pode simplificar este processo, permitindo que a convolução seja implementada como uma multiplicação no domínio da frequência, que é computacionalmente mais eficiente.

A modelagem do canal é essencial para entender e prever o comportamento do sistema de comunicação. Um modelo preciso do canal permite aos engenheiros simular o comportamento do sinal transmitido e otimizar os transmissores e receptores para maximizar a eficiência e a qualidade da comunicação.

Os canais móveis, em particular, possuem características estocásticas significativas devido a fatores como multipercurso, desvanecimento, efeito Doppler e sombreamento, já descritos anteriormente. Modelar essas características é crucial para o design e a implementação de sistemas de comunicação móveis robustos e confiáveis.

Ganho do Canal

O ganho G do sinal proporcionado pelo canal pode ser analisado em termos de amplitude, e geralmente é expresso em decibéis (dB). A expressão em decibéis para o ganho é dada por:

$$H_{dB} = G_{dB} = 10 \log[H(f) \cdot H^*(f)] = 10 \log[|H(f)|^2]$$

onde $H^*(f)$ é o conjugado complexo de $H(f)$, permitindo que o ganho seja expresso em termos de potência.

Entender a função de transferência do canal é de suma importância, pois afeta diretamente a integridade e eficácia da comunicação. A modelagem precisa dessas respostas permite que engenheiros antecipem e mitiguem os efeitos adversos do canal, garantindo uma transmissão de sinal mais clara e confiável. A modelagem de canais móveis, com suas complexidades inerentes, é particularmente desafiadora, mas essencial para o progresso contínuo na área de comunicações móveis.

1.2.4 Limitações Fundamentais do Canal de Comunicação

As limitações fundamentais de um canal de comunicação influenciam diretamente a qualidade e eficiência com que a informação é transmitida e recebida. Elas estão associadas tanto ao sinal que transporta a mensagem quanto ao próprio canal por onde o sinal é transmitido.

Largura de Banda do Canal

Cada meio de transmissão possui uma banda passante limitada, ou seja, uma faixa de frequências dentro da qual ele pode operar eficientemente. A largura de banda do canal é um parâmetro crucial porque determina a capacidade do canal de acomodar as variações do sinal transmitido com o tempo. Essa largura de banda limitada, denotada como B , restringe o espectro de frequências do sinal que pode ser transmitido sem sofrer atenuação significativa ou distorção.

Em canais de RF (Radiofrequência), a largura de banda é frequentemente definida em torno de uma frequência de transmissão específica, conhecida como frequência portadora. O transmissor define a banda em que o sinal será transmitido, adaptando-se à largura de banda disponível do canal e às suas características. A escolha da frequência portadora e a modulação do sinal são projetadas para se ajustar dentro dessa largura de banda e maximizar a eficiência da transmissão.

Capacidade do Canal

A taxa na qual a informação pode ser transmitida, conhecida como capacidade do canal (C), é limitada pela largura de banda do canal e pela razão sinal-ruído. A

capacidade do canal é uma medida da quantidade máxima de informação que pode ser transmitida de forma confiável sobre o canal e é dada pela fórmula de Shannon:

$$C = B \cdot \log (1 + S/N)$$

Esta equação mostra que a capacidade do canal cresce linearmente com a largura de banda B e logaritmicamente com a razão sinal-ruído S/N , implicando que há retornos decrescentes para o aumento de S/N em comparação com B .

1.3 Modelo do transmissor

1.3.1 Visão geral

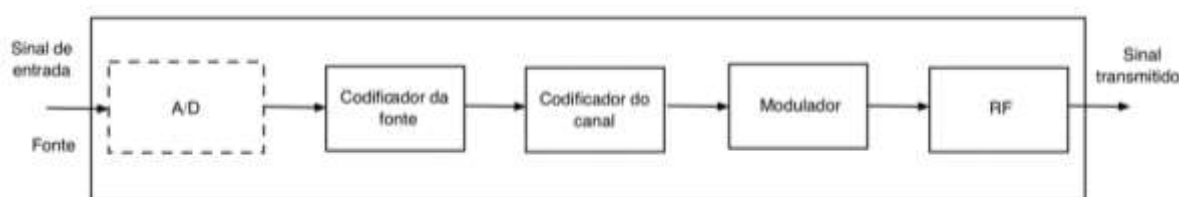


Figura 11 – Modelo geral do transmissor

A Figura 11 apresentada ilustra os componentes essenciais de um transmissor em um sistema de comunicação.

Conversor Analógico-Digital (A/D)

Este componente é responsável por converter o sinal analógico de entrada, proveniente da fonte, em um sinal digital. O processo de conversão A/D envolve amostragem (definindo a frequência de amostragem do sinal), quantização (definindo os níveis de sinal discretos), e codificação (convertendo os níveis de sinal em sequências de bits).

Codificador da Fonte

Após a conversão A/D, o codificador da fonte comprime os dados para remover redundâncias e irrelevâncias do sinal digitalizado, o que aumenta a eficiência da transmissão. Algoritmos de compressão podem ser aplicados aqui para reduzir a quantidade de dados a serem transmitidos sem perder informações críticas.

Codificador do Canal

O codificador do canal adiciona redundância ao sinal codificado pela fonte para protegê-lo contra erros que podem ocorrer durante a transmissão. Técnicas de codificação de canal, como a codificação de Hamming ou codificação convolucional, são utilizadas para permitir a detecção e, se necessário, a correção de erros no receptor.

Modulador

O modulador é o estágio em que o sinal digital preparado é convertido de volta a uma forma de sinal analógico, mas agora modulado em uma portadora de alta frequência para ser adequado para transmissão. Existem diversas técnicas de modulação, como AM (Modulação em Amplitude), FM (Modulação em Frequência), e modulações digitais como QAM (Modulação de Amplitude em Quadratura) e PSK (Modulação por Deslocamento de Fase).

RF (Radiofrequência)

Esta é a etapa final do transmissor, onde o sinal modulado é amplificado para níveis de potência adequados para a transmissão pelo meio escolhido. O estágio de RF também pode incluir o filtro de passagem de banda para assegurar que o sinal esteja dentro da banda alocada para a transmissão e que não interfira com outras comunicações.

Após a amplificação, o sinal é finalmente transmitido através de uma antena ou outro meio de transmissão apropriado. Cada um desses elementos trabalha conjuntamente para garantir que o sinal de entrada seja entregue com a maior fidelidade e eficiência ao seu destino.

1.3.2 Codificador da fonte

O codificador da fonte desempenha um papel vital em sistemas de comunicação digitais. Sua principal função é transformar uma sequência de dados, que pode ser digital ou representável por símbolos discretos, em uma nova sequência de símbolos que é geralmente mais eficiente para transmissão.

Na comunicação digital, a informação originária da fonte frequentemente contém redundâncias e não está otimizada para transmissão através de um canal com ruído e largura de banda limitada. O codificador da fonte atua na redução dessas redundâncias e, em alguns casos, na proteção contra erros.

Existem várias técnicas de codificação da fonte, e a escolha depende do tipo de dados e das exigências do sistema de comunicação. Alguns exemplos são:

- **Compactação de Dados.** Algoritmos de compressão de dados reduzem o tamanho do arquivo eliminando redundâncias. A compactação pode ser sem perda, como no algoritmo ZIP, onde os dados podem ser perfeitamente reconstruídos, ou com perda, como na codificação JPEG para imagens, onde há uma perda aceitável de qualidade em favor de uma redução significativa no tamanho dos dados.
- **Codificação de Entropia.** Baseia-se na frequência de ocorrência dos símbolos na mensagem. Técnicas como a codificação de Huffman atribuem códigos mais curtos para símbolos frequentes e códigos mais

longos para aqueles menos frequentes, o que resulta em uma sequência de símbolos que, em média, tem um tamanho menor do que a mensagem original.

- Codificação de Fonte de Canal. Às vezes, a codificação da fonte é combinada com a codificação de canal, que adiciona redundância para correção de erros. Embora isto aumente o tamanho da mensagem, melhora a robustez do sinal transmitido em face de erros introduzidos pelo canal de comunicação.
- Transformações de Símbolos. Transforma a mensagem em uma sequência de símbolos que é mais adequada para o canal específico. Por exemplo, numa transmissão digital de vídeo, a codificação de fonte pode incluir transformações como a Discrete Cosine Transform (DCT) para converter o sinal de imagem espacial para o domínio da frequência, onde a compressão pode ser mais eficientemente aplicada.

Em resumo, o codificador da fonte é essencial para maximizar a eficiência de transmissão em sistemas de comunicação, preparando os dados de entrada para o uso mais eficaz possível do canal de comunicação disponível, minimizando a largura de banda necessária e aumentando a robustez contra distúrbios do canal.

1.3.3 Codificador PCM

Um exemplo de codificador de fonte é o *Pulse Code Modulation* (PCM).

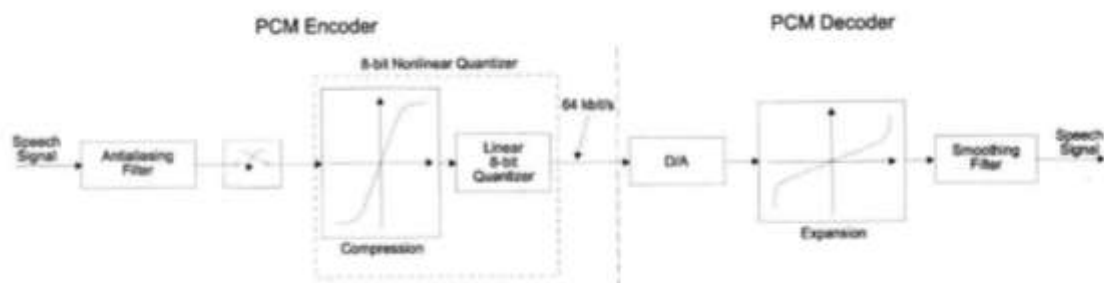


Figura 12 – Codificador/Decodificador PCM

O PCM, ou Modulação por Código de Pulso, é uma técnica fundamental em sistemas de comunicação digitais, particularmente na transmissão de sinais de voz. Vamos explorar os componentes do codificador PCM, conforme ilustrados na figura:

Filtro Anti-aliasing

O primeiro passo no codificador PCM é o filtro anti-aliasing. Este filtro é usado para preparar o sinal de fala para a digitalização, removendo as frequências acima da metade da taxa de amostragem. Isso é necessário de acordo com o Teorema de Nyquist, que afirma que um sinal deve ser amostrado pelo menos duas vezes a

sua frequência máxima para ser corretamente reconstruído depois. Sem esse filtro, frequências mais altas poderiam ser confundidas com frequências mais baixas no sinal amostrado, um fenômeno conhecido como *aliasing*.

Amostragem

Após o filtro *anti-aliasing*, o sinal é amostrado. Isso significa que são tiradas "fotografias" do sinal em intervalos regulares de tempo. A taxa de amostragem deve ser suficiente para capturar todas as variações importantes do sinal de fala para que, posteriormente, o sinal original possa ser reconstruído com precisão.

Quantizador Não Linear

O sinal amostrado contém uma infinidade de possíveis valores de amplitude. O quantizador não linear mapeia esses valores para um número limitado de níveis, de maneira que atribui mais níveis de quantização às amplitudes menores, que são mais comuns nos sinais de voz, e menos níveis às amplitudes maiores. Isso é feito porque o ouvido humano é mais sensível a variações de volume em sons mais baixos do que em altos, portanto, quantizar de maneira não linear permite uma representação mais fiel do sinal de voz, conforme percebido pelo ouvido.

Quantizador Linear

Após a quantização não linear, a informação é re-quantizada para uma forma que seja mais conveniente para processamento digital e transmissão. Isso é feito por um quantizador linear, que distribui os níveis de quantização de forma uniforme ao longo da faixa de sinal. Esta etapa é importante para facilitar a codificação binária subsequente do sinal amostrado.

No lado do decodificador PCM, o processo é invertido. O sinal quantizado é convertido de volta para analógico através de um Conversor Digital-Analógico (D/A). Uma expansão é realizada, que é basicamente o inverso da compressão feita pela quantização não linear, restaurando a faixa dinâmica original do sinal. Por fim, um filtro de suavização é aplicado para remover as discontinuidades entre os níveis de quantização e proporcionar um sinal de fala suave e natural.

O PCM é amplamente utilizado por sua robustez e simplicidade relativa, e a explicação acima cobre as etapas essenciais do processo sem entrar nas complexidades matemáticas.

1.3.4 Modulador

O modulador é um componente crítico no transmissor que prepara o sinal para o módulo de RF. Isso é feito ajustando um dos parâmetros — frequência, amplitude ou fase — de um sinal conhecido como portadora, com base no sinal de saída do

codificador da fonte, que é o sinal modulante. O processo de modulação, portanto, envolve duas formas de onda fundamentais:

- Sinal Modulante: É o sinal que contém a mensagem ou informação que precisa ser transmitida.
- Portadora: É uma onda senoidal pura que é ajustada pelo sinal modulante para criar um sinal modulado adequado para transmissão.

O sinal modulado resultante carrega a informação e é colocado na parte apropriada do espectro eletromagnético, garantindo propriedades espectrais que são otimizadas para transmissão através do canal de comunicação. Essas propriedades são cuidadosamente projetadas para minimizar a distorção e a interferência de sinais de outros usuários próximos no espectro. Além disso, elas visam alocar eficientemente o espectro disponível para acomodar o maior número possível de usuários na faixa de frequência designada.

Dependendo do tipo de sinal modulante, a modulação aplicada pode ser analógica ou digital.

- Modulação Analógica. Varia continuamente o parâmetro da portadora (amplitude, frequência ou fase) proporcionalmente ao sinal modulante analógico.
- Modulação Digital. Modifica a portadora em passos discretos de acordo com o sinal digital. Isso pode envolver a alteração de um ou mais parâmetros da portadora em intervalos de tempo definidos.

A largura de banda do sinal transmitido depende diretamente do tipo de modulação escolhida e do método de acesso múltiplo utilizado. A modulação pode ser analógica como FM (Modulação de Frequência) para comunicações de voz ou digital como QAM (Modulação de Amplitude em Quadratura) para transmissão de dados de alta velocidade.

A modulação assegura uma transmissão mais eficiente.

A eficiência da transmissão está ligada ao comprimento de onda do sinal, que por sua vez está relacionado à frequência de transmissão. Para transmitir eficientemente um sinal de RF, a antena deve ter dimensões relativas ao comprimento de onda do sinal. Geralmente, é ideal que a antena tenha pelo menos 1/10 do comprimento de onda, que é dado pela relação $\lambda = c/f$, onde c é a velocidade da luz (aproximadamente 300.000 km/s) e f é a frequência de transmissão.

Quanto às limitações de hardware, a modulação permite posicionar o sinal em uma frequência que ajuda a evitar, por exemplo, a contornar a resposta de

frequência dos componentes. A largura de banda fracional, $\Delta f = B/f_c$, onde B é a banda absoluta do sinal e f_c é a frequência central – frequência da portadora, é um fator importante. Uma largura de banda fracional entre 1 a 10% é geralmente desejável, pois facilita a implementação e reduz os custos.

A modulação também permite posicionar o sinal em uma parte do espectro onde o ruído e a interferência são minimizados, contribuindo para uma comunicação mais clara e confiável.

Finalmente a modulação proporciona a multiplexação de sinais, ou seja, combinar vários sinais e transmiti-los simultaneamente sobre um único canal de comunicação. A forma como isso se dá chama-se método de acesso múltiplo. O método de acesso pode ser, por exemplo, TDMA (Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo) ou CDMA (Acesso Múltiplo por Divisão de Código), determina como os sinais de diferentes usuários são organizados e transmitidos simultaneamente sem interferir uns com os outros.

Assim, a modulação é uma técnica fundamental que permite a transmissão de informações de maneira eficiente, superando desafios técnicos e ambientais, e otimizando o uso do espectro de frequências disponível.

Módulo de RF

O módulo de RF (Radiofrequência) é uma parte essencial do transmissor em sistemas de comunicação, especialmente aqueles que utilizam radiocomunicações. Este módulo é responsável por várias operações críticas, e vou descrever seu papel de acordo com o texto fornecido.

Operação na Faixa de Radiocomunicações

O módulo de RF é projetado para operar dentro das faixas de frequência destinadas às radiocomunicações. Essas faixas são cuidadosamente selecionadas para evitar interferência com outros serviços e para se alinharem com as regulamentações internacionais.

Amplificação do Sinal de Rádio

O módulo de RF amplifica o sinal modulado para o nível de potência necessário para a transmissão. A amplificação deve ser suficiente para que o sinal atinja o receptor pretendido, considerando as perdas inerentes à propagação do sinal através do espaço.

Emissão do Sinal para o Espaço

Em comunicações móveis, o sinal é emitido para o espaço a partir da antena do transmissor. Isso possibilita a comunicação sem a necessidade de uma conexão física direta entre o transmissor e o receptor.

Para isso é necessário utilizar a antena. As características das antenas, tanto do transmissor quanto do receptor, são fundamentais para o sucesso da transmissão. A diretividade de uma antena determina como o sinal é focalizado ou disperso no espaço. Uma antena altamente direcional pode concentrar a energia em uma direção específica, o que é ideal para comunicações ponto a ponto. O ganho da antena é uma medida de como a antena amplifica o sinal em uma direção específica em comparação com uma antena isotrópica (que irradia igualmente em todas as direções). Antenas com alto ganho são capazes de transmitir sinais mais fortes na direção desejada, o que pode aumentar significativamente o alcance e o desempenho do sistema.

O alcance de um sistema de comunicação é fortemente influenciado pelos parâmetros das antenas. Antenas com ganho adequado e diretividade apropriada podem maximizar o alcance, garantindo que o sinal chegue ao receptor com força suficiente para ser decodificado corretamente. O desempenho do sistema, especialmente em termos de clareza do sinal e taxa de erro de bits, também é influenciado por essas características.

Portanto, o módulo de RF é um elo vital entre o transmissor e o receptor em sistemas de comunicação, com sua função e performance sendo cruciais para a qualidade e eficácia da comunicação sem fio.

1.4 REFERÊNCIAS

- Alencar, Marcelo S.; TELEFONIA CELULAR DIGITAL, 3a ed; érica Saraiva; 2014.
- HAYKIN, Simon. "Sistemas de Comunicação". Editora Bookman, 5ª Edição, 2008.
- IEEE Xplore Digital Library. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/>.
- PROAKIS, John G.; SALEHI, Masoud. "Comunicações Digitais". Editora McGraw-Hill, 5ª Edição, 2008.
- RAPPAPORT, Theodore S. "Telecomunicações sem Fio: Princípios e Práticas". Editora Prentice Hall, 2ª Edição, 2002.
- Sociedade Brasileira de Telecomunicações. Disponível em: <http://sbrt.org.br/>.
- Stüber, Gordon L.; Principles of Mobile Communication; KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS; 2002.
- Wesolowski, Krzysztof; Mobile Communications Systems; JOHN WILEY & SONS; 2002.