Solução

Seja f_h a maior e f_l a menor freqüência. Considere ainda que a largura de banda seja representada por B. Então,

$$B = f_h - f_l = 900 - 100 = 800\text{Hz}$$

O espectro de freqüências possui somente cinco *spikes* localizados em 100, 300, 500, 700 e 900Hz (veja Fig. 3.14).

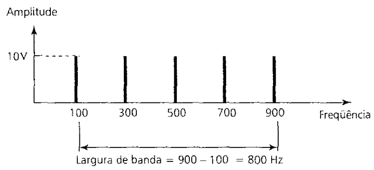

Figura 3.14 Exemplo 3.

Exemplo 4

Um sinal composto possui uma largura de banda de 20Hz. Sabendo que a maior freqüência vale 60Hz, qual é a menor freqüência que constitui esse sinal? Desenhe o espectro de freqüências considerando que o sinal contém todas as freqüências inteiras e de mesma amplitude entre a menor e a maior freqüências.

Solução

Seja f_h a maior freqüência e f_l a menor freqüência. Considere ainda que a largura de banda seja representada por B. Então,

$$B = f_h - f_l$$
$$20 = 60 - f_l$$
$$f_l = 60 - 20 = 40\text{Hz}$$

O espectro de freqüências inicia em 40Hz e estende-se até 60Hz, exibindo todas as freqüências inteiras nessa faixa. Na Figura 3.15, mostramos isso através de uma série de *spikes*.

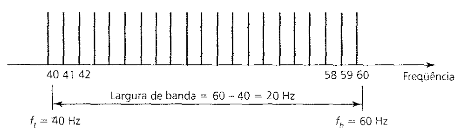

Figura 3.15 Exemplo 4.

Exemplo 5

Um sinal possui um espectro de freqüência que vai de 1 a 2kHz (largura de banda = 1kHz). Um meio pode transmitir freqüências compreendidas na faixa que vai de 3 a 4kHz (largura de banda = 1kHz). Este sinal consegue viajar através desse meio?

Solução

A resposta é definitivamente não. Embora o sinal tenha a mesma largura de banda do meio (1kHz), as faixas de freqüência não se sobrepõem. O meio só pode transmitir freqüências entre 3 e 4kHz. Nessa faixa, o sinal é totalmente perdido.

3.3 SINAIS DIGITAIS

Além da representação analógica, um sinal também pode possuir uma forma de representação digital. Nessa representação, em geral, o nível 1 equivale a uma tensão positiva e o nível 0 equivale ao referencial de zero volt (veja Fig. 3.16).

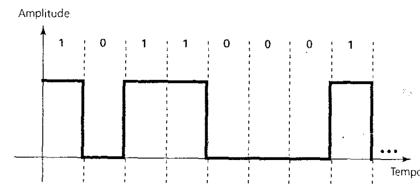

Figura 3.16 Um sinal digital.

Intervalo de Sinalização e Número de *Bits* por Segundo

A maioria dos sinais digitais não são periódicos. Sendo assim, os termos período e freqüência não são apropriados. Dois novos termos, *intervalo de sinalização* (no lugar de *período*) e *número de bits por segundo* (no lugar de *freqüência*) são utilizados para descrever sinais digitais. O **intervalo de sinalização** é o tempo necessário para enviar um único *bit*. O **número de *bits* por segundo** é a quantidade de intervalos de sinalização por segundo. Isto significa que o número de *bits* por segundo é a quantidade de *bits* enviados num tempo igual a 1s, usualmente expresso por ***bits* por segundo (bps)** (veja Figura 3.17).

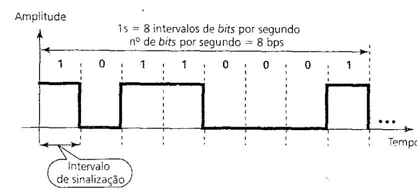

Figura 3.17 Intervalo de sinalização e número de *bits* por segundo.

Exemplo 6

Um sinal digital possui um número de *bits* por segundo de 2000bps. Qual é a duração de cada *bit*, ou seja, o intervalo de sinalização?

Solução

O intervalo de sinalização é o recíproco do número de *bits* por segundo. Logo,

$$\text{Intervalo de sinalização} = \frac{1}{\text{Número de } bits \text{ por segundo}} = \frac{1}{2000} = 0{,}0005\text{s} = 0{,}0005 \times 10^6 \mu\text{s} = 500\mu\text{s}$$

Sinal Digital como um Sinal Analógico Composto

Deve ficar claro por enquanto que um sinal digital, com tantas mudanças bruscas, é de fato um sinal composto de um número infinito de freqüências. Em outras palavras, a largura de banda de um sinal digital é infinita.

Um sinal digital é um sinal composto de largura de banda infinita.

Sinal Digital em um Meio Banda Larga

Se um meio possui uma largura de banda larga, mas finita, podemos enviar um sinal digital através dele. Claro que muitas freqüências serão bloqueadas pelo meio de transmissão, mas uma faixa de freqüências passantes existentes no sinal ainda deve ser suficiente para preservar decentemente a forma do sinal digital. Veremos adiante que é possível utilizar um meio dedicado, tal como um cabo coaxial, para enviar um sinal digital através de uma rede local até algumas centenas de metros sem repetidor.

Sinal Digital em um Meio de Largura de Banda Limitada

Podemos enviar um sinal digital através de um meio de transmissão de largura de banda limitada? A resposta para esta questão é definitivamente sim. Todos os dias, enviamos dados através do canal de voz (as linhas telefônicas) para a Internet. Mas, qual é a largura de banda (B) mínima, em hertz, necessária para enviar n bps? Dito de outra forma, qual é a relação entre o número de *bits* por segundo e a largura de banda de um meio? Estas questões serão respondidas formalmente quando discutirmos o teorema de Nyquist e a lei de Shannon para a capacidade de transmissão máxima de um meio. Nesta seção, faremos uma aproximação com o intuito de prepararmos o cenário para que os fundamentos da transmissão de dados sejam compreendidos.

Usando Apenas um Harmônico

Para simplificar a discussão, imagine que dispomos de um computador capaz de transmitir a apenas 6bps. Esta situação é hipotética de maneira a possibilitar a visualização dos resultados graficamente. Em cada segundo, o computador produz 6 *bits*. Num segundo podemos ter 111111, noutro 001010, depois 101010 e assim por diante. Representaremos o nível 1 com um valor de amplitude positiva e um valor de amplitude negativa representará o 0. A Figura 3.18 mostra dois sinais.

Vejamos se conseguimos simular qualquer um desses padrões utilizando um sinal com uma única freqüência. Os melhores casos são o 111111 ou 000000. Nesses casos, podemos enviar um sinal de freqüência zero. Os piores casos são definitivamente 101010 ou 010101. Eles são os piores casos porque, dentre todas as possíveis combinações de 1s e 0s em 6 *bits*, são os casos onde ocorrem o maior número de variações de 0 para 1 e vice-versa. Quanto maior o número de variações abruptas no sinal, maiores são as freqüências que o compõem. Entretanto, podemos simular este sinal digital usando um sinal analógico de freqüência 3Hz, ou seja, com a metade do número de *bits* por segundo. Assim, temos:

Melhor caso:	Número de *bits* por segundo = 6	freqüência = 0Hz
Pior caso:	Número de *bits* por segundo = 6	freqüência = 3Hz

Podemos verificar que todas as outras situações estão entre o melhor e pior caso. Desse modo, podemos simular os demais casos usando uma freqüência apenas, 1 ou 2 Hz, e utilizando a relação de fase apropriada.

Noutras palavras, se for necessário simular a transmissão deste sinal digital nessa taxa de 6bps, será necessário, às vezes, enviar um sinal de freqüência 0Hz, outras vezes de freqüência 1Hz, algumas vezes de 2Hz e outras de 3Hz. É claro que o meio utilizado para essa transmissão também deverá ser capaz de transmitir de 0 a 3Hz. Dessa forma, esse meio deverá ter uma largura de banda de 3Hz.

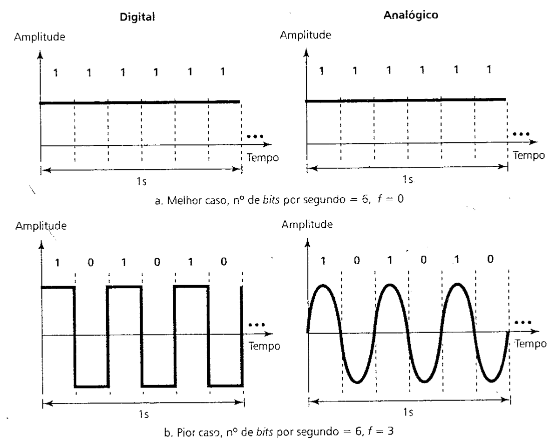

Figura 3.18 Digital *versus* analógico.

Se generalizarmos este exemplo simples, chegaremos a uma relação extremamente simples entre o número de *bits* por segundo e a largura de banda do meio. Para enviar n *bits* através de um canal analógico utilizando a aproximação anterior, necessitaremos de uma largura de banda tal que:

$$B = \frac{n}{2}$$

Usando Mais Harmônicos

A discussão anterior foi baseada num único harmônico. Para cada padrão predeterminado enviamos um sinal de única freqüência entre 0 e 3Hz. Porém, em muitas situações, enviar um sinal de uma única freqüência não é muito apropriado; o sinal analógico enviado pode parecer muito diferente do sinal digital pretendido e o receptor pode não reconhecer o padrão corretamente.

Para ajustar a forma do sinal e melhorar o processo de comunicação, particularmente em altas velocidades, necessitamos adicionar mais harmônicos ao sinal. Parece claro da discussão anterior que há necessidade de adicionarmos mais harmônicos de ordem ímpar para a transmissão de um sinal digital. Se adicionarmos o terceiro harmônico em cada caso, a largura de banda necessária seria: $B = n/2 + 3n/2 = 4n/2$Hz. Se adicionarmos o terceiro e quinto harmônicos, necessitaríamos de uma largura $B = n/2 + 3n/2 + 5n/2 = 9n/2$Hz e assim por diante. Noutras palavras, temos:

$$B >= \frac{n}{2} \quad \text{ou} \quad n <= 2B$$

A Tabela 3.2 mostra quais as larguras de banda necessárias para enviar 1Kbps utilizando este método.

Enfatizamos o seguinte: nesse método, assim como em outros, a largura de banda necessária para a transmissão é proporcional ao número de *bits* por segundo. Se dobrarmos o número de *bits*, precisaremos dobrar a largura de banda.

O número de *bits* e a largura de banda são proporcionais entre si.

TABELA 3.2 Requisitos de largura de banda

Nº de bits por segundo	*Harmônico 1*	*Harmônico 1, 3*	*Harmônico 1, 3, 5*	*Harmônico 1, 3, 5, 7*
1 Kbps	500 Hz	2 KHz	4,5 KHz	8 KHz
10 Kbps	5 KHz	20 KHz	45 KHz	80 KHz
100 Kbps	50 KHz	200 KHz	450 KHz	800 KHz

Largura de Banda Analógica *versus* Largura de Banda Digital

Toda a discussão anterior sobre a proporcionalidade entre a largura de banda e o número de *bits* conduz à idéia de largura de banda digital. Se estivermos enviando informação na forma analógica através de um meio, estaremos lidando com a largura de banda analógica desse meio (expressa em hertz). Agora, se estivermos enviando dados digitais através do meio, deveremos lidar com a largura de banda digital (expressa em *bits* por segundo). A largura de banda analógica é a faixa de freqüências que um meio permite a passagem. A largura de banda digital é o número máximo de *bits* por segundo que um meio pode transmitir. Em síntese, as duas representam a mesma propriedade do meio, mas diferem em escalas e unidades.

A largura de banda analógica de um meio é expressa em hertz e a largura de banda digital em *bits* por segundo.

Altas Taxas de Transmissão em *Bits* por Segundo

Na discussão anterior, alguns leitores podem ter ficado intrigados, especialmente se considerarmos a transmissão de dados cotidiana através do canal de voz. O canal de voz é utilizado pelos usuários comuns e possui uma largura de banda entre 3 e 4kHz. Entretanto, sabemos que às vezes enviamos (e recebemos) dados a velocidades bem maiores que 30kbps (utilizando um modem tradicional). De acordo com a nossa discussão, não deveríamos ser capazes de enviar mais de 8Kbps através do canal de voz! Então, o que há de errado na discussão anterior? Bem, não há nada errado na discussão anterior. O fato básico, não mencionado até aqui, é que os modems utilizam alguma técnica de modulação que permite a representação de múltiplos *bits* num único período de um sinal analógico. Discutiremos a fundo estas técnicas no Capítulo 5.

3.4 ANALÓGICO *VERSUS* DIGITAL

Chegamos finalmente à questão fundamental: devemos utilizar um sinal analógico ou um sinal digital? A melhor resposta a esta pergunta depende da situação e da largura de banda disponível no meio.

Passa-Baixas *versus* Passa-Banda (ou Passa-Faixa)

Um canal ou *link* de transmissão é um filtro passa-baixas ou passa-banda. Um **canal passa-baixas** permite a passagem de freqüências compreendidas entre 0 e f. Assim, nesse canal, o limite inferior de freqüência vale 0 e o limite superior pode ser qualquer freqüência (incluindo, possivelmente, o infinito). De outro modo, um **canal passa-banda** possui uma largura de banda compreendida entre as freqüências f_1 e f_2. A Figura 3.19 mostra as larguras de banda dos dois tipos de canais.

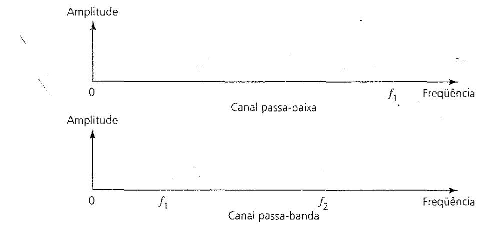

Figura 3.19 Passa-baixa *versus* passa-banda (ou passa-faixa).

Transmissão Digital

Um sinal digital precisa, teoricamente, de uma largura de banda infinita. O limite inferior (0Hz) é fixo e o limite superior (infinito) pode ir até onde nosso limite de aceitação permitir. É claro que, definindo o limite finito, o número de harmônicos fica limitado. No caso do canal passa-baixas isso significa uma largura de banda entre 0 e f.

Em geral, um canal passa-baixas é utilizado somente se o meio é dedicado entre dois dispositivos (ponto a ponto) ou compartilhado entre diversos dispositivos no tempo. Por exemplo, numa rede local coaxial, um cabo pode ser compartilhado entre as estações. Desse modo, nesse sistema, podemos transmitir dados digitalmente.

A transmissão digital necessita de um canal passa-baixas.

Transmissão Analógica

Um sinal analógico normalmente possui uma banda mais estreita que um sinal digital com freqüências entre f_1 e f_2. Dito de outra forma, um sinal analógico requer um canal passa-banda. Além disso, a largura de banda de um sinal analógico pode ser deslocada a nosso bel-prazer. Por exemplo, podemos sempre deslocar um sinal com uma largura de banda entre f_1 e f_2 para um sinal com uma largura de banda entre f_3 e f_4, mantendo a mesma largura de banda inicial.

Um canal passa-banda é mais comumente encontrado que um canal passa-baixas. A largura de banda de um meio pode ser dividida noutros canais passa-banda para transportar diversas transmissões analógicas. Por exemplo, numa analogia à telefonia celular, uma largura de banda limitada é dividida entre diversos usuários de telefone celular. Cada usuário possui uma largura entre 0 e 30kHz, com cada sinal deslocado apropriadamente.

A transmissão analógica pode usar um canal passa-banda.

Isto não significa que uma transmissão analógica não possa utilizar um canal passa-baixas. Significa apenas que, em geral, ela usa os canais mais disponíveis para transmissão: os canais passa-banda. Por fim, um canal passa-baixas é um caso especial de um canal passa-banda com $f_1 = 0$.

3.5 LIMITES PARA A TAXA DE TRANSMISSÃO DE DADOS

Uma questão suprajacente na transmissão de dados é: o quão rápido podemos enviar dados, em *bits* por segundo, através de um canal? A taxa de transmissão de dados depende de três fatores:

1. A largura de banda disponível
2. Os níveis de sinais que podemos utilizar
3. A qualidade do canal (o nível de ruído inerente ao canal)

Dois resultados teóricos foram desenvolvidos para determinar a taxa de transmissão de dados: um por Nyquist para um canal livre de ruído, outro por Shannon para um canal na presença de ruído.

Canal Livre de Ruídos: Fórmula para o Número de *Bits* por Segundo de Nyquist

Para um canal livre de ruídos, a **fórmula de Nyquist** determina o valor teórico máximo para a capacidade de transmissão de um meio, em *bits* por segundo:

$$C_N = 2 \times B \times \log_2 L$$

Nesta fórmula, B refere-se à largura de banda do canal utilizado, L é o número de níveis de sinais utilizados para representação de dados e a C_N é a capacidade de transmissão de Nyquist, o número de *bits* por segundo, de um canal livre de ruído.

Exemplo 7

Considere o canal de voz com uma largura de banda de aproximadamente 3kHz, transmitindo um sinal codificado em dois níveis de tensão. A taxa máxima de transmissão de dados pode ser calculada como:

$$C_N = 2 \times B \times \log_2 L = 2 \times 3000 \times \log_2 2 = 6.000\text{bps}$$

Exemplo 8

Considere o mesmo canal sem ruídos, transmitindo um sinal codificado em quatro níveis (para cada nível são enviados 2 *bits* por vez). A taxa máxima de transmissão de dados pode ser calculada como:

$$C_N = 2 \times B \times \log_2 L = 2 \times 3000 \times \log_2 4 = 12.000\text{bps}$$

Canal com Ruído: Lei de Shannon

Na realidade, um canal sem ruído é uma idealização. Sempre haverá ruído num canal. Em 1944, Claude Shannon introduziu um resultado, que hoje leva o nome dele, para determinar o limite teórico máximo da transmissão de dados para um canal com ruído:

$$C_S = B \times \log_2 (1 + \text{SNR})$$

Outra vez, B refere-se à largura de banda do canal utilizado, SNR é a **razão sinal-ruído** do canal e a C_S é a capacidade de transmissão de Shannon, ou seja, o número de *bits* por segundo de um canal na presença de ruído.

A razão sinal-ruído é uma relação estatística entre a potência do sinal pela potência do ruído no canal. Note que a fórmula de Shannon não menciona o número de níveis do sinal. Isto significa que não importa quantos níveis usamos, não conseguiremos transmitir dados numa taxa superior à capacidade imposta pelo canal. Noutras palavras, a fórmula determina uma característica do canal, não o método de transmissão.

Exemplo 9

Considere um canal com um nível de ruído extremamente alto. Nesse caso, podemos aproximar a razão sinal-ruído do canal para zero. Uma razão sinal-ruído nula indica que, não importa os esforços realizados, é impossível transmitir um sinal de comunicação através desse canal, pois o nível de ruído mascara e destroi completamente a informação que é feita passar no meio. Para o canal supracitado a capacidade é calculada através de:

$$C_S = B \times \log_2 (1 + \text{SNR}) = B \times \log_2(1+0) = B \times \log_2(1) = 0$$

Isto significa que a capacidade de transmissão é zero independentemente da largura de banda desse canal. De fato, não podemos receber dados transmitidos através desse tipo canal.

Exemplo 10

Vamos calcular o limite teórico máximo para a transmissão de dados através do canal de voz tradicional. Uma linha telefônica normalmente possui uma largura de banda de 3000Hz (300Hz a 3300Hz). A razão sinal-ruído de uma linha telefônica boa vale 3162. Para este canal, a capacidade é calculada por:

$$C_S = B \times \log_2 (1 + \text{SNR}) = 3000 \times \log_2(1+3162) = 3000 \times \log_2(3163)$$

$$C_S = 3000 \times 11{,}62 = 34.860\text{bps}$$

Isto significa que a maior taxa de transmissão de dados através da linha telefônica é aproximadamente 34Kbps. Se quisermos transmitir dados em velocidades maiores que esta, podemos aumentar a largura de banda da linha ou melhorar (aumentar) a razão sinal-ruído.

Usando Ambos Limites

Na prática, precisamos utilizar ambos métodos para determinar que largura de banda e quantos níveis de codificação serão necessários numa transmissão. Vamos ilustrar isso através de um exemplo.

Exemplo 11

Suponha um canal com uma largura de banda de 1MHz e uma razão sinal-ruído de 63. Qual é a capacidade máxima desse canal e o número de níveis de codificação apropriados à transmissão?

Solução

Primeiramente, usamos a lei de Shannon para determinar o limite superior de transmissão do canal.

$$C_S = B \times \log_2 (1 + \text{SNR}) = 10^6 \times \log_2(1 + 63) = 10^6 \times \log_2(64) = 6\text{Mbps}$$

Embora a fórmula de Shannon dê 6Mbps, este é o limite superior. Para uma melhor *performance* escolhemos, arbitrariamente, um limite inferior: por exemplo 4Mbps. Em seguida, usamos a fórmula de Nyquist para determinar o número de níveis de codificação.

$$4\text{Mbps} = 2 \times 1\text{MHz} \times \log_2 L \Rightarrow L = 4$$

3.6 TRANSMISSÃO COM PERDAS

Os meios de transmissão por onde enviamos sinais não são perfeitos. As imperfeições do meio provocam o enfraquecimento e deformação do sinal. Isto significa que a potência e o padrão do sinal no transmissor e no receptor, acoplados nas duas extremidades do meio, não são as mesmas. Assim, o que é enviado não é aquilo que é recebido. Existem três tipos de perdas comuns em meios: atenuação, distorção e ruído (veja a Fig. 3.20).

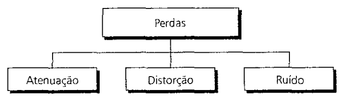

Figura 3.20 Tipos de perdas.

Atenuação

Atenuação significa perda de energia. Quando um sinal, simples ou composto, viaja num meio, irremediavelmente perde energia. Muitas vezes essa perda é associada à resistência do meio. No caso de meios metálicos que transportam corrente elétrica, um efeito de aquecimento (denominado efeito Joule) provoca atenuação do sinal. Uma parte da energia transportada pelo sinal no meio é convertida em calor e perdida durante o processo de transmissão. Para compensar essa perda, amplificadores podem ser utilizados para restaurar o nível do sinal*. A Figura 3.21 mostra os efeitos da atenuação e da amplificação.

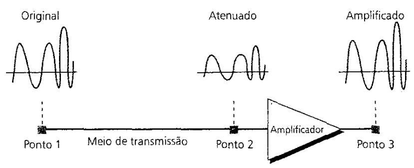

Figura 3.21 Atenuação.

Decibel

Para lidar com sinais de diferentes níveis de potência, os engenheiros usam o conceito de decibel. O **decibel (dB)** mede as intensidades relativas entre dois sinais ou um mesmo sinal em dois pontos diferentes. Para manter as coisas em ordem, perceba que o decibel deve ser negativo se um sinal é atenuado e positivo se um sinal for amplificado.

$$dB = 10 \times \log_{10}(P_2/P_1)$$

onde P_1 e P_2 são as potências do sinal nos pontos 1 e 2, respectivamente.

* N. de R. T.: Um amplificador é excelente, mas não faz milagre. Para que o nível de potência de um sinal seja restaurado, o amplificador deve retirar energia de uma fonte CC externa. Assim, a lei de conservação da energia permanece intacta e inviolável.

Exemplo.12

Imagine que ao viajar através de um meio um sinal perca metade da potência original. Isto significa que $P_2 = 1/2P_1$. Nesse caso, a atenuação (perda de potência) pode ser calculada por:

$$10 \times \log_{10}(P_2/P_1) = 10 \times \log_{10}(0{,}5\,P_1/P_1) = 10 \times \log_{10}(0{,}5) = 10 \times (-0{,}3) = -3\text{dB}$$

Técnicos e engenheiros sabem que −3dB ou uma perda de 3dB é equivalente a uma redução de metade da potência de um sinal.

Exemplo 13

Imagine que um sinal é amplificado 10 vezes por um amplificador. Isto significa que $P_2 = 10 \times P_1$. Nesse caso, o nível de amplificação de potência em decibel é calculado por:

$$10 \times \log_{10}(P_2/P_1) = 10 \times \log_{10}(10P_1/P_1) = 10 \times \log_{10}(10) = 10 \times (1) = 10\text{dB}$$

Exemplo 14

Uma das razões dos engenheiros utilizarem o decibel para medir as variações de intensidade de um sinal é que os números em decibel podem ser somados ou subtraídos diretamente, quando muitos pontos estiverem sendo analisados simultaneamente (análise em cascata dos pontos). Na Figura 3.22, um sinal viaja uma grande distância entre os pontos 1 e 4. O sinal é atenuado entre os pontos 1 e 2. Entre os pontos 2 e 3 o sinal é amplificado. Novamente, entre os pontos 3 e 4 o sinal é atenuado. Podemos determinar o nível em decibel resultante entre os pontos 1 e 4 adicionando as medidas em decibel entre esse conjunto de pontos.

Nesse caso, o nível em decibel total pode ser calculado por:

$$dB = -3 + 7 - 3 = +1$$

Este resultado indica que, ao viajar entre os pontos 1 e 4, o sinal aumentou o nível de potência.

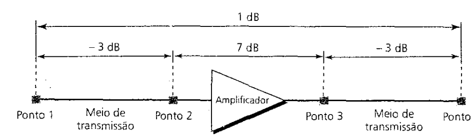

Figura 3.22 Exemplo 14.

Distorção

A **distorção** é alteração da forma de um sinal ao propagar-se num meio ou ao ser amplificado em um circuito. A distorção ocorre freqüentemente em sinais compostos. O problema é que cada componente do sinal possui uma velocidade de propagação (veja a próxima seção) característica através do meio de suporte e, portanto, atrasa de modo diferente para chegar ao destino final. A Figura 3.23 mostra o efeito da distorção em um sinal composto.

Ruído

O **ruído** é outro problema. Um sinal pode ser corrompido por diversos tipos de ruídos diferentes, tais como o ruído térmico, ruído induzido, *crosstalk* e o ruído impulsivo. O ruído térmico é provocado pelo movimento aleatório (agitação térmica) de elétrons nos condutores que gera um sinal extra, diferente daquele originado no transmissor. O ruído induzido é provocado pelo acionamento

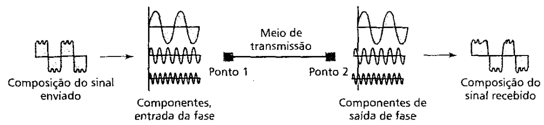

Figura 3.23 Distorção.

de cargas indutivas, tais como de motores e outros aparelhos. Estas cargas agem como antenas transmissoras, enquanto que o meio de transmissão age como antena receptora. *Crosstalk* é o efeito que uma corrente num condutor provoca no outro. Um condutor age como antena transmissora e o outro como antena receptora. Por fim, o ruído impulsivo é uma resposta abrupta no meio (um sinal com uma energia muito alta por um intervalo de tempo muito curto) proveniente de redes elétricas, de iluminação e outras fontes. A Figura 3.24 ilustra o efeito de um ruído sobre um sinal viajando num meio.

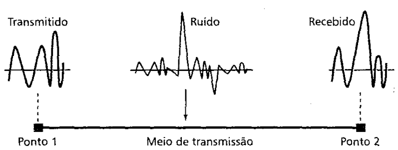

Figura 3.24 *Ruídos.*

3.7 UM POUCO MAIS SOBRE SINAIS

Existem outros quatro parâmetros de medida usados na comunicação de dados: *throughput*, velocidade de propagação, tempo de propagação e comprimento de onda. Discutiremos estes parâmetros nesta seção, antes de fechar o capítulo.

Throughput

O ***throughput*** é uma medida da velocidade com que os dados cruzam um ponto ou uma rede. Noutras palavras, se considerarmos o ponto como sendo um plano vertical que seciona o meio, o *throughput* é o número de *bits* que atravessa esse plano em um segundo. A Figura 3.25 apresenta o conceito.

Velocidade de Propagação

A **velocidade de propagação** é uma medida da distância que um sinal ou *bit* pode viajar, através de um meio, numa unidade de tempo de 1 segundo. A velocidade de propagação de sinais eletromagnéticos depende do meio e da freqüência do sinal. Por exemplo, no vácuo, a luz propaga-se com uma velocidade de 3×10^8m/s. A velocidade da luz no ar é menor que o valor do vácuo e é menor ainda dentro de uma fibra óptica.

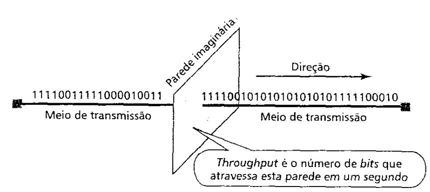

Figura 3.25 *Throughput.*

Tempo de Propagação

O **tempo de propagação** mede o tempo necessário para que um sinal ou um *bit* viaje de um ponto específico no meio de transmissão a outro. O tempo de propagação é calculado dividindo a distância percorrida pela velocidade de propagação do sinal. A Figura 3.26 ilustra o conceito.

Tempo de propagação = distância/velocidade de propagação

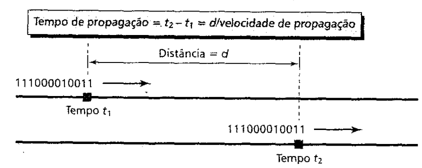

Figura 3.26 Tempo de propagação.

Comprimento de Onda

O **comprimento de onda** é outra característica importante de um sinal que viaja num meio de transmissão. O comprimento de onda une o período ou a freqüência de uma senóide simples com a velocidade de propagação do meio. De outra maneira, enquanto a freqüência de um sinal independe do meio, o comprimento de onda guarda uma relação estreita com a freqüência e o meio. Embora possamos associar um comprimento de onda a sinais elétricos, é melhor utilizá-lo quando estivermos lidando com a transmissão de luz numa fibra óptica ou com transmissão de ondas eletromagnéticas em meios abertos. O comprimento de onda é a distância que um sinal simples pode viajar durante um período do sinal (veja Figura 3.27).

Podemos determinar o comprimento de onda se forem conhecidos a velocidade de propagação e o período do sinal.

Comprimento de onda = velocidade de propagação × período

Além disso, como período e freqüência estão relacionados entre si, também podemos fazer:

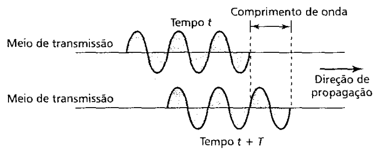

Figura 3.27 Comprimento de onda.

Comprimento de onda = Velocidade de propagação × (1/freqüência) = Velocidade de propagação/freqüência

Se representarmos o comprimento de onda através da letra grega λ (lê-se lambda), a velocidade de propagação por c (velocidade da luz) e a freqüência por f, temos:

$$\lambda = c/f$$

Em comunicação de dados, o comprimento de onda normalmente é medido em micrômetros (mícrons). Por exemplo, vamos determinar o comprimento de onda da luz vermelha ($f = 4 \times 10^{14}$Hz) no ar:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^{8} \text{m/s}}{4 \times 10^{14} \text{Hz}} = \frac{3 \times 10^{8} \text{m/s}}{4 \times 10^{14} (1/s)} = 0{,}75 \times 10^{-6} \text{m} = 0{,}75 \mu\text{m}$$

Entretanto, num cabo coaxial ou numa fibra óptica o comprimento de onda é menor (0,5μm) porque a velocidade de propagação dentro do cabo é menor que a velocidade de propagação no ar.