

APONTAMENTOS DA DISCIPLINA DE

Fundamentos das Telecomunicações

DO CURSO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA

Vasco Freitas

**Universidade do Minho
2003**

Capítulo 1

Introdução

Com a transmissão da primeira mensagem de telégrafo através de uma linha de 16 Km, efectuada por Samuel Morse em 1838, teve início a era das comunicações eléctricas. Dessa altura até ao presente, a engenharia das comunicações avançou até ao ponto de se poder assistir na televisão à emissão directa de naves espaciais a partir de Marte. O telefone, a rádio e a televisão tornaram-se parte integrante da vida moderna. Texto, dados, voz e imagem percorrem o globo terrestre em fracções de segundo através de circuitos de longa distância e de satélites. Os computadores trocam informação com outros computadores através das *redes de dados* com cobertura intercontinental. Ao longo das próximas décadas assistir-se-á, sem dúvida, a uma evolução ainda mais extraordinária da tecnologia e dos serviços de telecomunicações devido ao crescente envolvimento das tecnologias da informática, sinergia que está na origem do que se vem designando por *teleinformática* ou *telemática*.

É pois muito importante não só que os técnicos de telecomunicações tenham conhecimentos profundos sobre computadores como também que os engenheiros de informática possuam noções sobre os fundamentos das comunicações eléctricas à distância, as suas possibilidades e limitações e o estado desta tecnologia.

Um sistema de comunicações tem por objectivo o transporte de informação desde a sua fonte até um destino situado à distância. Os domínios de aplicação dos sistemas de comunicação são tão variados que não nos é praticável referir a todos eles num curso introdutório. Torna-se também impossível, neste contexto, apresentar e discutir em detalhe todas

as partes que constituem estes sistemas. Nem é necessário. Um sistema de comunicação típico envolve inúmeros sub-sistemas, ou componentes, cuja análise e projecto se enquadram, tradicionalmente, no âmbito dos vários ramos da engenharia electrotécnica: os circuitos e a electrónica, o electromagnetismo, o *hardware* dos computadores, etc. O estudo detalhado destes componentes obscureceria a questão essencial segundo a qual um sistema de comunicação é um todo integrado cuja funcionalidade excede a soma das partes. Trataremos pois o tema das comunicações dum ponto de vista geral e integrado embora procurando não perder o rigor.

Reconhecendo que todos os sistemas de comunicação têm por objectivo fundamental a *transferência de informação* procuraremos isolar os princípios e os problemas fundamentais que se apresentam ao transporte de informação.

Na primeira parte deste curso abordaremos o *nível físico*, isto é, a representação da informação e a sua transmissão sob a forma de sinais eléctricos. Examiná-lo-emos com a profundidade suficiente que permita compreender o que se passa na realidade física e as limitações fundamentais que se enfrentam. Na segunda parte do curso, abordaremos o *nível lógico* das comunicações, isto é, partindo do princípio que o sub-sistema de transmissão físico existe e é fiável, trataremos da comunicação *fim-a-fim*, dos problemas que se colocam a este nível e das técnicas para os resolver. Esta será uma abordagem mais algorítmica, orientada à realização de serviços de aplicações de comunicações por via de *software* e de sistemas de computação.

1.1 Informação, Mensagens e Sinais

O conceito de *informação* é crucial em comunicações. Embora possa ser quantificado com precisão, o termo *informação* tem conotações semânticas e filosóficas de difícil definição. Estas dificuldades podem ser evitadas se em lugar de informação lidarmos com *mensagens*. A mensagem é definida como a manifestação física da informação tal como é produzida pela fonte. Qualquer que seja a forma em que a mensagem é apresentada, o objectivo de um sistema de comunicação é o de reproduzir, no destino, uma cópia aceitável dessa mensagem.

Existem muitos tipos de fontes de informação, incluindo pessoas e máquinas, e as mensagens aparecem sob a forma mais variada. Podem, no

entanto, identificar-se duas categorias distintas de mensagens: as *analógicas* e as *digitais*. A cada uma delas, aplica-se um critério distinto de avaliação do sucesso ou desempenho (*performance*) da comunicação.

Uma mensagem *analógica* é representada por uma grandeza física que varia no tempo de uma maneira *suave* e contínua. A pressão acústica produzida pela fala, a posição angular de um instrumento de medida ou a intensidade da luz num ponto de uma imagem de televisão são exemplos de mensagens analógicas. Dado que a informação reside numa forma de onda que varia no tempo, um sistema de comunicação analógico deve entregar esta forma de onda com um determinado grau de *fidelidade*.

Uma mensagem *digital* é representada por uma sequência ordenada de símbolos escolhidos de entre um conjunto, normalmente finito. As letras do alfabeto, uma listagem das leituras horárias de temperatura ou as teclas premidas a um terminal de computador constituem exemplos de símbolos das mensagens digitais. Como a informação está contida nos símbolos, e na sua sequência, um sistema de comunicação digital deverá entregar esses símbolos com um determinado grau de *certeza* num determinado intervalo de tempo.

Quer sejam analógicas quer sejam digitais, poucas são as fontes de mensagens inerentemente eléctricas. Consequentemente, a maior parte dos sistemas de comunicação possuem *transdutores* de entrada e de saída, como mostra a figura 1.1. O transdutor de entrada converte a mensagem

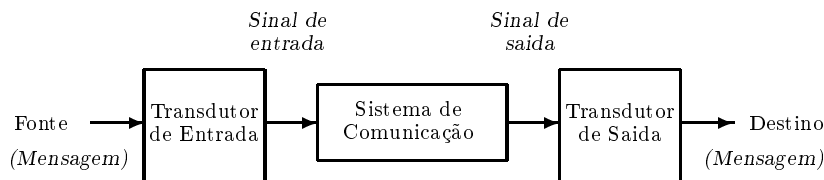


Figura 1.1: Sistema de comunicação incluindo transdutores

num *senal* eléctrico, por exemplo uma tensão ou uma corrente, e o transdutor de saída converte o sinal à saída do sistema, na forma mais apropriada de mensagem a ser entregue no destino. Num sistema de comunicação telefónico os transdutores serão o microfone à entrada e o altifalante, ou auscultador, à saída. Consideraremos de aqui em diante que existem transdutores apropriados tanto à entrada como à saída e concentraremos a atenção na função de *transmissão do sinal*. Nestas condições, os termos

senal e *mensagem* serão utilizados com o mesmo significado dado que o sinal, tal como a mensagem, constituem a representação física da informação.

1.2 Elementos de um Sistema de Comunicação

A figura 1.2 representa os elementos de um sistema de comunicação onde se omitiram os transdutores e se incluíram as contaminações indesejáveis, genericamente designadas por *ruído*. Existem três partes essenciais num

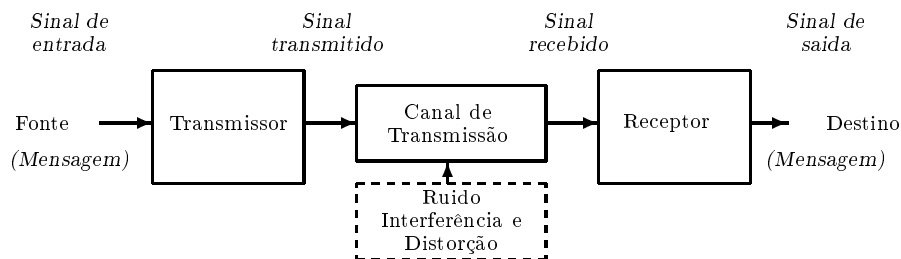


Figura 1.2: Elementos de um sistema de comunicação

sistema de comunicação: o transmissor, o canal de transmissão e o receptor. Cada uma destas três partes desempenha um papel específico na transmissão do sinal:

O *transmissor* processa o sinal de entrada de modo a produzir um sinal bem adaptado às características do canal de transmissão. O processamento do sinal para a transmissão quase sempre envolve a *modulação* e a *codificação de linha*.

O *canal de transmissão* é o meio físico que o sinal percorre desde a fonte até ao destino. Pode ser constituído por um par de fios condutores, cabo coaxial, o espaço livre, fibras ópticas, etc, todos eles servindo de suporte à transmissão das ondas electromagnéticas. Todos estes meios físicos introduzem no sistema *perdas* de transmissão ou *atenuação* do sinal, e assim, a potência do sinal decresce progressivamente com a distância.

O *receptor* opera sobre o sinal de saída do canal preparando-o para a entrega ao transdutor de destino. As operações no receptor consistem na *amplificação*, para compensar as perdas, na *desmodulação* e na *descodificação*, efectuando o processamento inverso do do transmissor. A

filtragem é uma outra função importante do receptor, como se verá mais adiante. Durante a transmissão do sinal aparecem vários efeitos indesejáveis. A atenuação é indesejável dado que reduz a *força* do sinal no receptor. Mais sérios, contudo, são a distorção, a interferência e o ruído que aparecem como alterações à forma do sinal. Embora tais contaminações possam ocorrer em qualquer ponto do sistema, a convenção que se adopta é a de as atribuir inteiramente ao canal, considerando-se portanto como ideais, tanto o transmissor como o receptor. A figura 1.2 reflecte esta convenção.

A *distorção* é a perturbação da forma de onda causada por uma *resposta* imperfeita do sistema ao próprio sinal. A distorção desaparece quando o sinal desaparece o que não acontece com a interferência e com o ruído.

A *interferência* é a contaminação por sinais estranhos ou externos ao sistema, produzidos por fontes de origem humana (não-naturais), tais como outras transmissões, as linhas de transporte de energia eléctrica, as máquinas eléctricas, os circuitos de comutação, etc. A interferência ocorre mais frequentemente em sistemas com canais rádio cujas antenas de recepção interceptam vários sinais simultaneamente. A interferência de rádio-frequência (RF) também aparece em cabos se os fios, ou o receptor, captam sinais radiados por fontes próximas. A interferência pode ser eliminada através de filtragem apropriada na medida em que os sinais interferentes ocupem uma banda de frequências diferente da do sinal desejado.

O *ruído* consiste em sinais aleatórios e imprevisíveis produzidos por processos naturais tanto internos como externos ao sistema de comunicação. Quando tais variações aleatórias se sobrepõem a um sinal portador de informação, a mensagem pode corromper-se parcialmente ou mesmo perder-se completamente. A filtragem reduz a contaminação pelo ruído mas este não pode ser totalmente eliminado. Este ruído residual é inevitável constitui uma das limitações fundamentais dos sistemas de comunicação eléctricos.

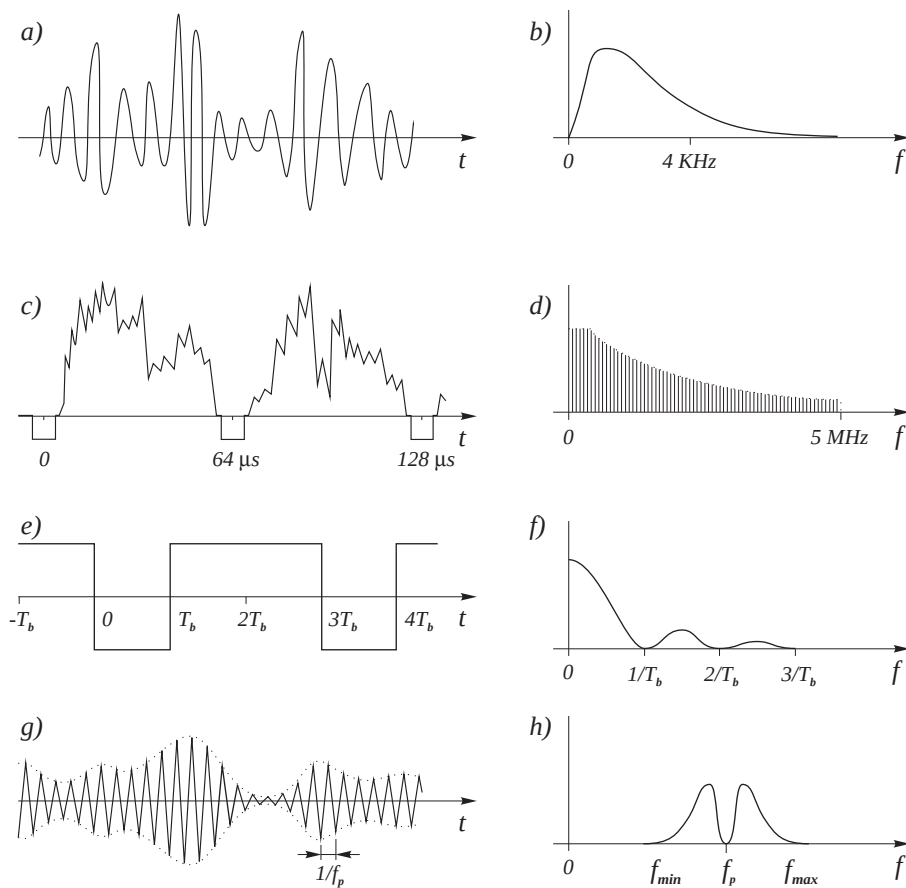
No sistema da figura 1.2 a transmissão efectua-se num só sentido, o que se designa por transmissão **simplex** (SX). A transmissão nos dois sentidos requer, obviamente, um transmissor e um receptor de cada lado. Designa-se por sistema **full-duplex** (FDX), ou simplesmente **duplex** aquele que permite a transmissão simultânea em ambos os sentidos. Se a transmissão fôr possível em ambos os sentidos mas não simultaneamente, o sistema designa-se por **half-duplex** (HDX), ou **meio-duplex**.

1.3 Sinais de Comunicação

A forma de onda de tensão produzida por um microfone em resultado da pressão acústica da fala constitui um exemplo de um sinal eléctrico. A forma que a onda de voz terá, depende da mensagem, isto é, do que foi dito, das características da voz da pessoa que falou e das características do microfone. A figura 1.3(a) mostra uma forma típica deste sinal. A tensão eléctrica varia continuamente no tempo duma maneira imprevisível sendo a função do sistema de comunicação produzir uma réplica tão fiel quanto possível deste sinal no receptor. Por exemplo, o sinal pode ser transportado até ao receptor através de um par de fios mas, se as distâncias forem grandes, o sinal será rapidamente atenuado e a acumulação de interferência e distorção pode torná-lo completamente irreconhecível no destino.

Todos os meios de transmissão possuem características próprias afectando os sinais de maneira diferente. O espaço livre, por exemplo, atenua em poucos metros os sinais de baixa frequência dissipando-os completamente enquanto que os de frequência mais elevada percorrem com muito menor atenuação vários quilómetros. Torna-se portanto necessário *modular* o sinal de voz para a banda de frequência mais adaptada ao canal (ou meio) de transmissão a utilizar. Neste caso, em que o meio é o espaço livre, ter-se-á de adoptar um sinal portador de rádio-frequência para transportar o sinal de voz. É este tipo de modificações ao sinal da fonte, que o tornam compatível com o canal disponível, que o transmissor tem de efectuar.

Na prática não é necessário, nem possível, reproduzir exactamente o sinal no receptor. Basta apenas uma aproximação. Este ponto é muito importante e influencia significativamente o projecto de sistemas de comunicação. O sinal de voz, por exemplo, pode ser passado através de um filtro que lhe retire certas componentes de frequência e permanecer ainda perfeitamente inteligível. Pode fazer-se uma ideia de quais as componentes do sinal que mais importância têm na sua preservação, examinando a distribuição da potência do sinal pelas várias frequências que o compõem como se mostra na figura 1.3(b). Esta forma de representação do sinal é designada de *espectro de potência* ou *função densidade espectral de potência* e será estudada no próximo capítulo. Basta por agora referir que um sistema de comunicação deve possibilitar uma boa transmissão na banda de frequências na qual o espectro de potência do sinal é mais significativo. Qual o nível de potência que podemos considerar significa-



- | | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| (a) Forma de onda de áudio | (b) Espectro do sinal de áudio |
| (c) Forma de onda de vídeo | (d) Espectro do sinal de vídeo |
| (e) Forma de onda binária | (f) Espectro do sinal binário |
| (g) Sinal de banda passante | (h) Espectro de banda passante. |

Figura 1.3: Formas de onda de sinais típicos e respectivos espectros

tivo, é uma questão em aberto. Dizer que um sinal de voz foi ou não significativamente alterado é uma questão subjectiva mas, na realidade, a qualidade de um canal de comunicação pode necessitar ser avaliado na base de testes subjectivos.

Através de tais testes subjectivos chegou-se à conclusão de que, se um canal de comunicação "deixa passar", relativamente inalteradas, as componentes do sinal com frequências no intervalo crítico de 300 Hz a 4.3 KHz, então o sinal de voz é inteiramente inteligível. Por este motivo os sistemas telefónicos possuem filtros destinados a limitar o sinal de voz a esta banda de frequências. Dado que os filtros, na prática, são imperfeitos, os sinais telefónicos de voz são tratados como sendo sinais de 4 KHz na banda de base, isto é, contendo frequências desde 0 Hz até 4000 Hz. À amplitude do intervalo de frequências em que um sinal tem componentes significativas chama-se *largura de banda* do sinal.

O sinal de voz, embora importante, é só um de entre a grande variedade de sinais transportadores de informação. Os sinais de música de alta fidelidade contêm componentes de frequência significativos ao longo de todo o intervalo audível que se estende, aproximadamente, desde os 20 Hz aos 20 KHz. Pode obter-se uma boa reprodução tratando os sinais de música como sendo de banda de base e com uma largura de banda de 15 KHz.

A televisão constitui outro exemplo. O requisito de largura de banda de um sinal de vídeo é de 5 MHz (5×10^6 Hz) em banda de base, para sinais da qualidade da radiodifusão. Tem algum sentido, portanto, o provérbio que diz, *uma imagem vale mais do que mil palavras*. Faremos a prova desta asserção quando tratarmos da teoria da informação.

A figura 1.3(c) ilustra uma forma de onda de um sinal de televisão, correspondente ao varrimento de uma linha de écran. A amplitude do sinal corresponde à intensidade luminosa encontrada nessa linha. A figura 1.3(e) mostra um sinal binário típico em transmissão de dados ou em transmissão digitalizada. A tensão varia no tempo entre dois valores discretos. O intervalo mais pequeno entre transições, T_s , é o intervalo de sinalização, ou tempo de símbolo (neste caso em que o símbolo é binário, o tempo de símbolo designa-se por T_b), sendo $r_s = \frac{1}{T_s}$ o *ritmo de símbolos* em *símbolos por segundo*, unidade que se designa também por **baud** (neste caso, igualmente, são dígitos binários por segundo, $r_b = \frac{1}{T_b}$).

Pode verificar-se através do espectro de potência que a maior parte da

potência do sinal está concentrada nas frequências abaixo de $\frac{1}{T_b}$ Hz. Deve esperar-se, portanto que a largura de banda de transmissão exigida a um sistema de transmissão de dados binário seja proporcional ou talvez da mesma ordem de grandeza do ritmo binário. Basta notar, de momento, que se fôr necessário enviar uma grande quantidade de dados num curto intervalo de tempo é necessário que o sinal possua um ritmo elevado e portanto, também, um sistema de elevada largura de banda. É normal terem-se ritmos de 155 Mbit/s nas actuais redes de telecomunicações existindo sistemas experimentais que operam a ritmos superiores a 10 Gbit/s (Gigabit/s = 10^9 bit/s).

Os sinais a que nos vimos referindo são todos do tipo *banda de base*, isto é, as suas componentes de frequência estão concentradas numa banda de frequências que se estende desde 0 Hz, o sinal contínuo, até uma frequência máxima f_{max} à qual corresponde, aproximadamente o mesmo valor da largura de banda, B ($B \approx f_{max}$). Nem todos os sinais são deste tipo. Alguns são, como se costuma designar, de *banda passante*, concentrados numa banda de frequências que se estende desde uma frequência mais baixa, f_{min} , até uma mais elevada, f_{max} , possuindo uma largura de banda $B \approx f_{max} - f_{min}$. A figura 1.3(g) representa a forma de onda de um sinal de banda passante. Os sinais deste tipo são obtidos dos sinais de banda de base através da operação de *modulação*. Como já se referiu, o objectivo desta operação é o de permitir que a mensagem possa ser transmitida através de um canal de banda passante.

1.4 Limitações Fundamentais

A engenharia das telecomunicações confronta-se com dois tipos gerais de limitações. Por um lado existem os *problemas tecnológicos*, tão diversos como a disponibilidade de *hardware*, os factores económicos, a regulamentação oficial, etc. São problemas de viabilidade que, em teoria, podem ser resolvidos, embora por vezes as soluções perfeitas possam não ser práticas. Por outro lado, existem as *limitações físicas fundamentais*, isto é, as que são ditadas pelas leis da natureza. São estas limitações que em última instância determinam o que pode ou não pode ser realizado, independentemente dos problemas tecnológicos.

As limitações fundamentais à transmissão da informação por meios eléctricos são a *largura de banda* e o *ruído*.

O conceito de largura de banda aplica-se tanto aos sinais como aos sistemas de transmissão que os transportam, constituindo uma medida de *velocidade* com se pode transferir informação desde a fonte até ao destino. Quando um sinal possui variações rápidas no tempo o seu *espectro* contém frequências elevadas e o sinal possuirá eventualmente uma grande largura de banda. De igual modo, a facilidade com que um sistema de comunicação consegue reproduzir, ou "acompanhar", as variações do sinal de entrada é uma consequência da sua *característica de frequência* traduzida por uma *largura de banda de transmissão*, B_T . Ora, todos os sistemas eléctricos são constituídos por componentes que armazenam e transferem energia não o podendo fazer instantaneamente. Consequentemente, todo o sistema de transmissão possui uma largura de banda finita (B_T) a qual limita a sua *resposta* à variação dos sinais.

As comunicações em condições de tempo real necessitam suficiente largura de banda de transmissão para comportar o espectro do sinal, caso contrário, o sinal sofrerá distorção. Como se referiu anteriormente, um sinal de vídeo de TV exige uma largura de banda de vários Megahertz ($B_T \approx 5$ MHz) enquanto que as variações muito mais lentas de um sinal de voz se encaixam numa banda de cerca de $B_T \approx 4$ KHz. Por outro lado, como se demonstrará mais tarde na secção 3.10.2, se o sinal for digital tal como o da fig. 1.3(e), com um ritmo $r_s = \frac{1}{T_s}$ simb/s, exigirá do sistema de transmissão uma largura de banda não inferior a $\frac{r_s}{2}$, isto é,

$$B_T \geq \frac{r_s}{2} \text{ Hz} \quad (1.1)$$

relação cuja inversa implica que dado um sistema de transmissão com uma largura de banda B_T , o ritmo máximo teórico de sinais digitais que por ele se podem transmitir é

$$\boxed{r_s = 2 B_T \text{ símbolos/s}} \quad (1.2)$$

ritmo este designado por *ritmo de Nyquist*.

Convém acrescentar que os sinais digitais não são necessariamente binários. A mensagem duma fonte discreta pode ser representada por um sinal com mais do que dois níveis lógicos. A figura 1.4 mostra um sinal quaternário no qual a tensão varia discretamente entre quatro níveis distintos. Duma maneira geral, cada nível representa um *símbolo*. Tal como se disse para o sinal binário, o intervalo de tempo entre dois símbolos consecutivos representa o tempo do símbolo, T_s , e o seu inverso, $\frac{1}{T_s}$, é o ritmo de símbolos que é medido em **baud** (símbolos por segundo). Enquanto que no sinal

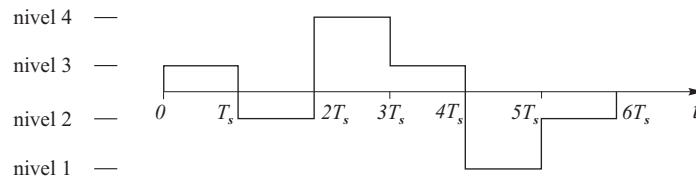


Figura 1.4: Forma de onda de um sinal quaternário

binário o símbolo pode ser representado por um dígito binário, neste sinal o símbolo é representado por um dígito quaternário. Torna-se evidente que o sinal quaternário é capaz de transportar duas vezes mais informação do que o sinal binário com o mesmo ritmo de símbolos. Efectivamente, se o sinal binário contiver 1 *bit* de informação por cada símbolo, o sinal quaternário conterá 2 *bits* de informação por símbolo. Este raciocínio leva-nos a introduzir o *bit* como unidade de medida relativa de informação. A *Teoria da Informação*, que trataremos em capítulo mais adiante, utiliza o termo *bit* para designar a unidade de medida (absoluta) de informação, distintamente da sua utilização como abreviatura de dígito binário. Por esta razão e para distinguir as duas situações em que o termo pode ser utilizado, se adopta o termo *símbolo* para designar um elemento do sinal discreto mesmo quando esse elemento pertence a um conjunto binário.

No caso da transmissão sem limitações de tempo real, a largura de banda disponível determina a velocidade máxima a que o sinal pode ser transmitido. O tempo necessário para transmitir uma dada quantidade de informação é, consequentemente, proporcional a B_T .

O ruído impõe uma segunda limitação à transmissão de informação. A justificação para a inevitabilidade do ruído é-nos dada pela teoria cinética das partículas. A temperaturas superiores a zero absoluto, a energia térmica faz com que as partículas materiais microscópicas fiquem possuídas de movimento aleatório. O movimento aleatório de partículas carregadas electricamente, tais como os electrões, dá origem a correntes e tensões aleatórias designadas por *ruído térmico*. Existem outros tipos de ruído, mas o térmico aparece em todos os sistemas de comunicação.

Caso não houvesse ruído, a capacidade de transmissão de um sistema de comunicação seria tão grande quanto se desejasse – teóricamente infinita. Uma maneira de realizar esta capacidade ilimitada seria a de aumentar indefinidamente o número de níveis distintos do sinal discreto da figura 1.4. Mas a presença do ruído introduz tensões aleatórias que se adicionam

ao sinal. Se o intervalo entre níveis fôr mais pequeno do que a amplitude de variação do ruído ao longo de todo o percurso da transmissão, a sobreposição dos dois sinais dará origem a erros como a figura 1.5 exemplifica. Neste exemplo, o facto da tensão de ruído entre os instantes $2T_s$ e $3T_s$ fazer com que o sinal permaneça num nível errado durante um certo tempo pode, ou não, ser considerado como erro. Tudo depende da decisão que o receptor tomar. Olhando para a representação gráfica do

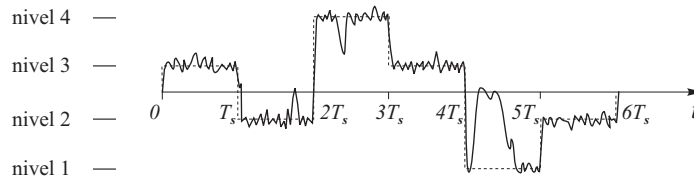


Figura 1.5: Sinal quaternário afectado de ruído

sinal resultante (a traço contínuo), mesmo desconhecendo a forma de onda transmitida (a tracejado) é mais provável que o nível certo seja o 4 e não o 3 pois o sinal permanece a maior parte do tempo do símbolo junto ao nível 4. Mas quanto ao que se passa entre os instantes $4T_s$ e $5T_s$ já a decisão não será tão óbvia. Teríamos certamente dificuldade em decidir entre os níveis 1 e 2. Se o receptor adoptar uma regra de decisão tal que o valor tomado como correcto é o valor do nível no instante médio do intervalo do símbolo (obtido por amostragem), então o sinal recebido terá dois símbolos errados. Se, por outro lado, a decisão do receptor fôr tomada na base do valor médio da amplitude do sinal durante o intervalo do símbolo, então, entre $2T_s$ e $3T_s$ o receptor detectará (decidirá a favor de) o nível 4 e não o nível 3 e, entre $4T_s$ e $5T_s$ detectará o nível 2. O sinal recebido teria um símbolo errado. É claro que o receptor não tem possibilidade de saber isto. Simplesmente, a segunda regra de decisão parece ser melhor do que a primeira. O valor médio é dado pelo integral do sinal no intervalo do símbolo dividido pela amplitude deste intervalo. Em lugar do integral do sinal costuma considerar-se o integral do quadrado do sinal, do que resulta uma quantidade com significado físico muito mais expressivo: a sua potência média, S .

De igual forma, o ruído é considerado um sinal aleatório, $n(t)$, possuindo uma determinada densidade de potência, η Watt/Hz praticamente constante em todo o domínio das frequências (espectro electromagnético), a que corresponde uma potência média total na banda do canal de $N = \eta B_T$

Watts.

A influência do ruído num sinal de informação mede-se em termos da *razão de potências sinal-ruído*, $\frac{S}{N}$. A potência do ruído térmico é normalmente pequena pelo que a razão sinal-ruído, $\frac{S}{N}$, pode ser suficientemente elevada que o ruído passe despercebido. Para pequenos valores de $\frac{S}{N}$, contudo, o ruído degrada a fidelidade das comunicações analógicas e dá origem a erros nas comunicações digitais. Estes problemas tornam-se críticos nas comunicações a longas distâncias quando as perdas de transmissão reduzem a potência do sinal recebido para níveis da ordem de grandeza da potência do ruído. Qualquer amplificação efectuada no receptor não resolve o problema porque o ruído será amplificado juntamente com o sinal.

Tomando ambas estas limitações em consideração, ou seja, a largura de banda do sistema de comunicação e o ruído nele presente, o matemático Claude Shannon demonstrou, em 1948, que cada sistema de comunicação é caracterizado por uma quantidade C , a *capacidade do canal*¹, dada por

$$C = B_T \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \text{ bits/s} \quad (1.3)$$

e que o ritmo de informação não pode exceder esta *capacidade*². A relação 1.3, conhecida por Lei de Hartley-Shannon, estabelece um limite superior ao desempenho (*performance*) de um sistema de comunicação com uma dada largura de banda e um dado valor da razão sinal-ruído. Ela será justificada quando se abordar a Teoria da Informação.

1.5 Modulação e Codificação

O transmissor efectua duas operações extremamente importantes destinadas a permitir uma transmissão de informação rentável e fiável: a *modulação* e a *codificação*. Discuti-las-emos em seguida com um pouco mais de pormenor antes de as tratarmos mais rigorosamente em capítulos posteriores.

¹o termo *canal* é utilizado, no contexto da Teoria da Informação, no seu sentido mais lato significando uma *via* de comunicação, isto é, um sistema de comunicação simplex completo e não sómente o canal físico ou meio de transmissão

²a base que se adopta para o logaritmo depende da unidade de medida da informação escolhida.

1.5.1 Técnicas de Modulação

A modulação envolve duas formas de onda: o sinal *modulante* que representa a mensagem e a onda *portadora*. Um modulador tem por função alterar sistematicamente a onda portadora de acordo com as variações da amplitude do sinal modulante. É desta forma que a onda modulada resultante "transporta" a informação contida na mensagem. Em geral, pretende-se que a modulação seja uma operação inversível de forma a permitir a recuperação da mensagem sob a forma do sinal modulante original. A operação inversa é a *desmodulação*.

O sinal da figura 1.3(g) é a onda modulada resultante da modulação de uma onda portadora sinusoidal por um sinal modulante analógico. A figura 1.6 ilustra este processo. O sinal (c) foi obtido adicionando uma constante ao sinal modulante (a) seguido de uma multiplicação pela onda portadora (b), isto é, a onda modulada foi obtida variando a amplitude da portadora de acordo com a amplitude do sinal modulante. Trata-se da familiar modulação de amplitude (AM) utilizada em radiodifusão. A

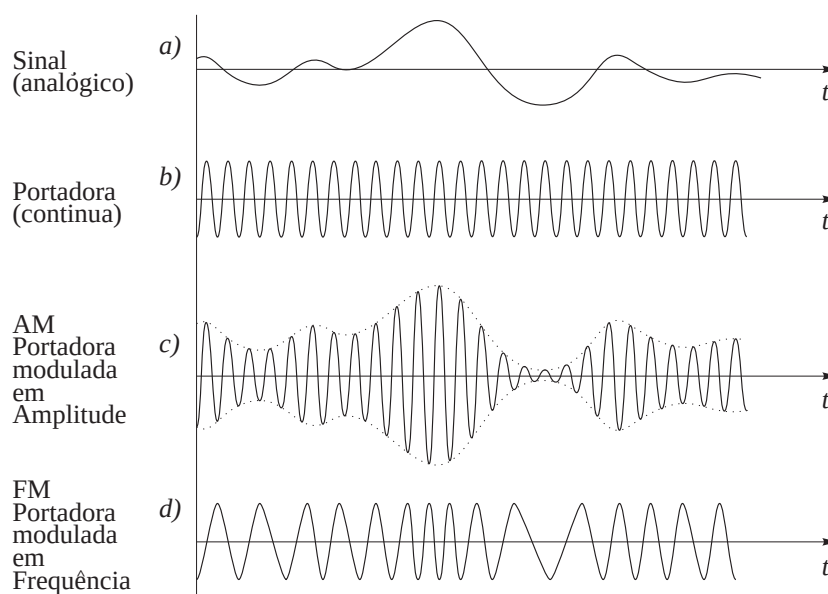


Figura 1.6: Formas de onda em modulação analógica de onda contínua

mensagem pode igualmente ser impressa sobre a portadora por modula-

ção de frequência (FM) ou por modulação de fase (PM) consoante é a frequência ou a fase da portadora que se faz variar com a amplitude do sinal modulante. O sinal (d) na figura 1.6 representa a onda (a) modulada em frequência.

Estes três processos de modulação de portadora sinusoidal são designados de *modulação de onda contínua*. O processo da fala constitui uma modulação de onda contínua. As cordas vocais geram ondas portadoras de várias frequências que ao passar pela cavidade bucal são moduladas em amplitude através das acções musculares que fazem variar o volume e a geometria desta cavidade. O que se ouve não é mais do que um sinal acústico modulado em amplitude, semelhante a um sinal AM.

Estes casos constituem o que se designa por modulação analógica de onda contínua porque o sinal modulante é analógico. Quando o sinal modulante é digital a modulação designa-se por modulação digital de onda contínua. A figura 1.7 mostra um sinal binário e as suas formas moduladas em amplitude (ASK, Amplitude Shift Keying também chamada OOK, On-Off Keying), em frequência (FSK, Frequency Shift Keying) e em fase (PSK, Phase Shift Keying). A maior parte dos sistemas de transmissão a longa

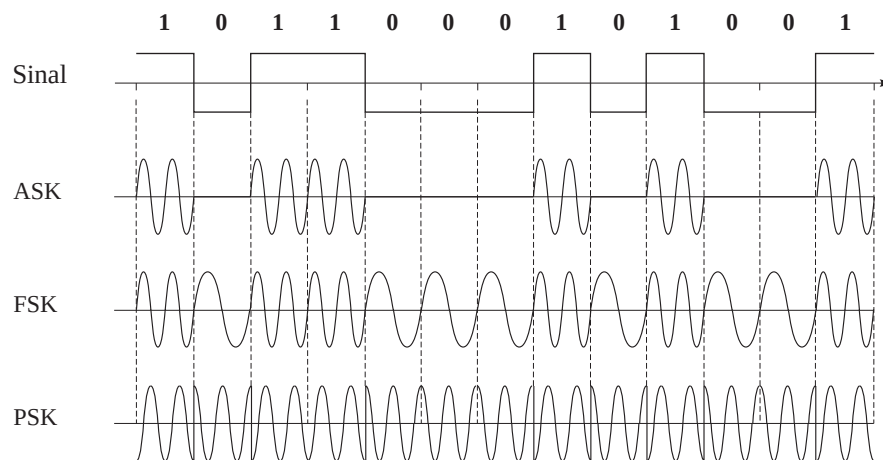


Figura 1.7: Formas de onda em modulação digital de onda contínua

distância empregam modulação de onda contínua com frequências da portadora muito maiores do que a maior componente de frequência do sinal modulante. O espectro do sinal modulado consiste portanto numa banda

de frequências concentradas à volta da frequência da portadora conforme mostra a figura 1.3(h). Diz-se, por isso, que a modulação de onda contínua efectua uma *translação de frequência* do espectro do sinal modulante. Em radiodifusão AM, por exemplo, o espectro da mensagem estende-se tipicamente desde 100 Hz até 5 KHz. Se a frequência da portadora fôr de 600 KHz, o espectro da portadora modulada situa-se entre 595 KHz e 605 KHz.

Um outro método de modulação é o chamado *modulação de impulso* em que a portadora é uma sequência periódica de pulsos³ de curta duração. A figura 1.8 mostra a forma de onda do sinal modulante (a), e a forma de onda resultante (c) da modulação em amplitude de uma sequência periódica (b) de pulsos de amplitude constante, duração τ e período T_a . A sequência de pulsos de amplitude variável assim obtida designa-se por sinal PAM (*Pulse Amplitude Modulation*).

Interessa realçar que o sinal PAM consiste numa sequência de amostras extraídas do sinal analógico. Por este motivo, a modulação de impulso em amplitude toma o nome de *amostragem*, ou *sampling* na designação inglesa. A *amostragem* constitui uma técnica importante de processa-

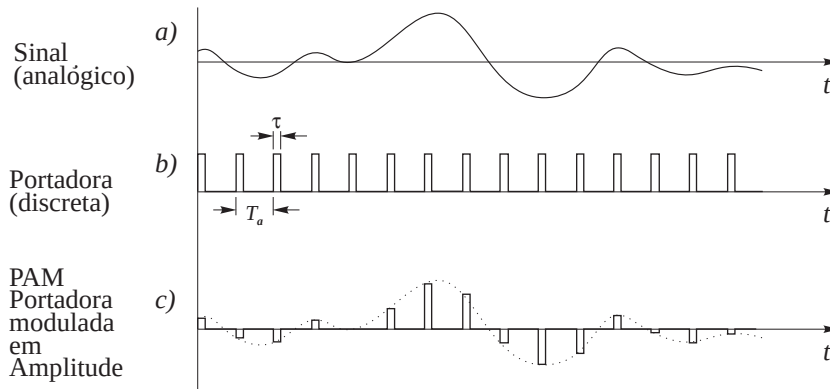


Figura 1.8: Modulação de impulso em amplitude

mento do sinal. Se a amostragem fôr efectuada em certas condições, é

³embora se designe por modulação de *impulso* o sinal que é modulado é uma sequência de *pulsos*. O pulso é uma aproximação física do impulso, isto é, tem uma duração não-nula e uma amplitude positiva limitada. Reservaremos o termo *impulso* para designar o pulso de duração nula.

possível *reconstruir* completamente a forma de onda contínua original a partir das amostras periódicas. A digitalização das fontes contínuas é feita por este processo. Mas a modulação de impulso (amostragem), só por si, não produz a translação de frequência necessária à transmissão do sinal. É pois necessário combinar a modulação de impulso com uma subsequente modulação de onda contínua.

A maior parte dos sistemas de transmissão digitais efectuem ainda uma operação intermédia àquelas duas – a *codificação*.

A *codificação* consiste na transformação de cada uma das amostras do sinal, isto é, cada pulso PAM, num número binário. Esta transformação é conseguida através duma operação de *quantização* seguida de *conversão analógico-digital*. O número binário assim obtido é representado por um sinal (eléctrico) binário o qual vai modular uma onda contínua para efeitos de transmissão.

1.5.2 Vantagens e Aplicações da Modulação

O objectivo primeiro da modulação é o de gerar um sinal adaptado às características do canal físico de transmissão. A modulação apresenta várias vantagens práticas algumas das quais se discutem a seguir.

Modulação para rentabilização da transmissão

A transmissão de sinais a grandes distâncias envolve ondas electromagnéticas progressivas, guiadas ou não, num meio de transmissão. O rendimento de um determinado meio físico de transmissão depende da frequência do sinal que o percorre. Manipulando convenientemente a propriedade de translação de frequência da modulação de onda contínua, o sinal representativo da mensagem pode ser sobreposto a uma portadora cuja frequência tenha sido seleccionada para o meio desejado.

Como exemplo refiramos a transmissão de um sinal desde uma antena de emissão até uma antena de recepção em linha de vista uma da outra. Comprova-se que para que haja radiação na emissão e portanto propagação através do espaço livre, a dimensão física da antena tem de ser pelo menos $\frac{1}{10}$ do comprimento de onda do sinal a transmitir. O comprimento de onda, λ , está relacionado com a frequência, f , pela expressão

$$f \cdot \lambda = \nu \quad (1.4)$$

em que ν é a velocidade de propagação das ondas electromagnéticas no meio físico considerado. No caso do espaço livre esta velocidade é praticamente igual à velocidade da luz no vácuo $\nu \approx c \approx 3 \times 10^8$ m/s (e nos meios condutores $\nu \approx 2 \times 10^8$ m/s). Se tentássemos transmitir um sinal de audio sem modulação, o qual contém componentes de frequência a partir dos 100 Hz necessitaríamos de uma antena com cerca de 300 Km de comprimento, o que é, naturalmente, impraticável. Modulando o sinal numa portadora de 100 MHz (100×10^6 Hz), tal como em radiodifusão de FM, a dimensão suficiente da antena é da ordem de 1 metro.

A figura 1.9 mostra as zonas do espectro electromagnético apropriadas à transmissão de sinais. A figura inclui as frequências e os comprimentos de onda no espaço livre, as designações das bandas normalizadas pela ITU-R⁴ e os modos de propagação.

Modulação para a multiplexagem

A multiplexagem é uma operação que combina vários sinais a fim de serem transmitidos simultaneamente através do mesmo canal. A multiplexagem por divisão de frequência (FDM, Frequency Division Multiplexing) utiliza a modulação de onda contínua para colocar cada sinal sobre uma portadora de frequência diferente. No destino, os sinais são separados por filtragem. A multiplexagem por divisão de tempo (TDM, Time Division Multiplexing) utiliza a modulação de impulso para colocar amostras de sinais diferentes intercaladas no tempo. Consideremos dois sinais modulados em impulso pelo processo indicado na figura 1.8. Os intervalos entre pulsos de um dos sinais podem ser ocupados pelas amostras de outros sinais.

No receptor, as amostras correspondentes a cada um dos sinais têm de ser separadas de modo a se poder reconstituir cada um dos sinais originais. Esta separação é efectuada por circuitos lógicos. Um cabo coaxial é capaz de transportar cerca de 1 800 sinais de voz multiplexados. A multiplexagem permite pois aumentar o rendimento das comunicações na medida em que permite utilizar ao máximo a capacidade de transmissão

⁴ITU-R – International Telecommunications Union - Radio, é o sector de radiocomunicações da ITU responsável pelo estudo das questões técnicas relacionadas com as comunicações via rádio e possuindo algum poder regulador nesta área através das normas ITU. Anteriormente designado por CCIR – Consulting Committee for International Radio.

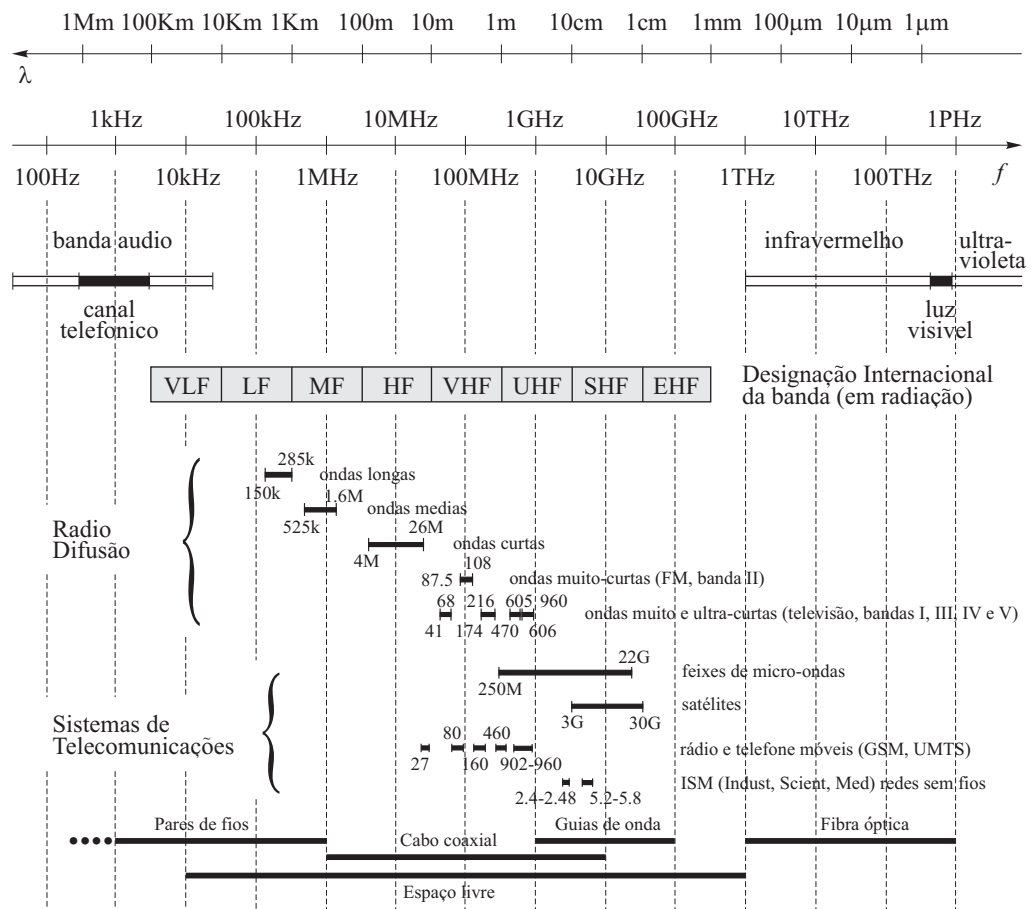


Figura 1.9: Utilização do espectro electromagnético

de informação disponível do canal físico utilizado.

1.5.3 Técnicas de Codificação

Descreveu-se a modulação como uma operação de *processamento do sinal*. A *codificação* é uma operação de *processamento do símbolo* destinada a melhorar a comunicação quando a informação é digital e pode ser representada por símbolos discretos. Tanto a codificação como a modulação podem tornar-se necessárias, em conjunto, para se conseguir uma transmissão fiável a longa distância.

A operação de *codificação* transforma uma mensagem digital numa nova sequência de símbolos. A *descodificação* converte a sequência codificada na mensagem original, provavelmente com alguns erros, que surgiram na transmissão. A maior parte dos métodos de codificação envolve circuitos lógicos manipulando símbolos binários.

Considere-se um terminal de computador ou uma outra qualquer fonte discreta cujo alfabeto contém $M \gg 2$ símbolos. A transmissão não-codificada de uma mensagem desta fonte necessitaria de M formas de onda diferentes, uma para cada símbolo. Alternativamente, cada símbolo pode ser representado por uma *palavra de código binária*, um número de k dígitos binários. Dado que existem 2^k palavras diferentes com k dígitos binários, são necessários $k \geq \log_2 M$ dígitos por cada palavra de código para codificar os M símbolos da fonte. Se a fonte produzir r_s símbolos por segundo, o código binário é produzido a um ritmo de $r_b = kr_s$ dígitos por segundo e a largura de banda necessária para a transmissão é k vezes maior do que seria necessária para a transmissão do sinal não-codificado.

Apesar de requerer uma maior largura de banda, a codificação em binário de uma fonte M -ária apresenta duas vantagens. Em primeiro lugar um sinal binário só necessita de duas formas de onda distintas e os circuitos electrónicos serão menos complicados. Em segundo lugar o ruído afecta menos um sinal binário do que um sinal composto por M formas de onda diferentes. Trata-se, portanto, de um método de codificação essencialmente destinado a reduzir o ruído por alargamento da banda do sinal.

A *codificação para controlo de erros* vai um passo mais além no sentido da redução do ruído por alargamento da banda. Adicionando *dígitos de verificação* suplementares a cada palavra de código binária é possível detectar ou mesmo corrigir a maior parte dos erros. Este tipo de codificação aumenta tanto a largura de banda como a complexidade do *hardware*, desvantagens que são compensadas ao obter-se uma comunicação isenta de erros apesar de uma razão sinal-ruído baixa. A utilização do conhecido dígito de verificação de *paridade* constitui um exemplo, embora o mais rudimentar, deste tipo de codificação.

Considere-se agora a situação oposta, isto é, o caso de uma fonte discreta e binária e um sistema de comunicação com uma razão sinal-ruído adequada mas pequena largura de banda. Esta situação é típica em redes de comunicação por computador que utilizam canais telefónicos. A codificação de blocos de k dígitos binários em símbolos M -ários *reduz* a largura de banda do sinal de um factor $k = \log_2 M$, permitindo portanto

aumentar o ritmo de informação num canal de largura de banda limitada. Existem ainda outras técnicas mais sofisticadas, de natureza estatística, designadas genericamente por *codificação da fonte* com as quais se consegue *comprimir* ainda mais a largura de banda do sinal. Basicamente, estas técnicas tentam reduzir ou mesmo eliminar a *redundância* dos sinais ou mensagens que são produzidos pela fonte.

Finalmente interessa referir que os benefícios da codificação digital podem ser incorporados em sistemas de comunicação *analógicos* através da utilização de conversão analógico-digital tais como a modulação de impulso codificado (MIC), mais conhecido por PCM (Pulse Code Modulation). Um sinal PCM é gerado por amostragem do sinal analógico, dando origem ao sinal PAM, seguido de quantização das amplitudes e da sua conversão em números binários. O sistema PCM constitui a tecnologia mais utilizada na digitalização de sistemas de comunicação analógicos, tais como o telefone e a televisão. A manipulação dos sinais pode ser efectuada com microprocessadores em lugar de circuitos electrónicos analógicos que são, em geral, mais complexos.

1.6 Problemas

1.1 – Considere a expressão de lei de Hartley-Shannon dada pela equação 1.3. O valor da potência média total do ruído, N , representa somente a parte do ruído presente no meio ambiente do sistema de comunicação que *passa* até ao destino pelo facto do sistema possuir uma largura de banda de valor B_T Hz. Isto é, se o ruído no canal de transmissão se apresentar com uma densidade η Watt/Hz, a potência total do ruído no receptor é de $N = \eta \cdot B_T$ Watt. Considere que num sistema de comunicação com uma densidade de ruído $\eta = 10^{-8}$ W/Hz se transmite um sinal eléctrico digital com uma potência média tal que o seu valor no destino é $S = 100$ μ W.

a) Determine o ritmo máximo de transmissão de informação pelo sistema de comunicação (capacidade do canal) se este possuir uma largura de banda de:

- i) $B_T = 1$ KHz
- ii) $B_T = 10$ KHz
- iii) $B_T = 100$ KHz

- b) Compare os valores obtidos na alínea anterior com os ritmos de Nyquist para cada caso, dados pela equação 1.2, e discuta a sua implicação na codificação do sinal.
- 1.2 – Considere um sistema de transmissão com uma largura de banda $B_T = 4 \text{ KHz}$ e densidade de ruído $\eta = 10^{-13} \text{ W/Hz}$. Determine o valor mínimo que a potência do sinal deve ter à saída do sistema (no receptor) para se obter uma transmissão fiável de informação aos seguintes ritmos:
- a) 64 Kbits por segundo
 - b) 128 Kbits por segundo
 - c) 256 Kbits por segundo
- 1.3 – Considere a figura 1.9 onde se representam as bandas de frequência atribuídas aos vários serviços de comunicações. Dê uma ideia dos comprimentos dos elementos de antena para a emissão e recepção de
- a) Televisão na banda I (VHF)
 - b) Televisão na banda III (UHF)
 - c) Rádio em FM (banda II, UHF)
 - d) Satélites
 - e) Redes de dados sem fios
- 1.4 – O interface de comunicações de um computador entrega para transmissão na sua porta dados a uma velocidade de 8 KBytes/s. A linha a que a porta está ligada tem largura de banda $B_T = 18 \text{ KHz}$.
- a) Indique como poderia o transmissor da porta fazer a codificação dos dados antes de os transmitir para a linha.
 - b) De acordo com essa codificação, esquematize a forma do sinal na linha ao transmitir a sequência 0x25B1 e indique qual o ritmo de símbolos de linha gerado?

fim do capítulo 1