# Projecto Faraday

Textos de Apoio

# Comunicações e Som

11º Ano de Escolaridade

Projecto Faraday

casa das ciências

Porto, Outubro de 2009

# Ficha Técnica

## Projecto Faraday

Projecto de intervenção no ensino da Física no secundário.

### Financiamento

Fundação Calouste Gulbenkian.

### Execução

Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

### Escolas Participantes

- ES Filipa de Vilhena
- ES Fontes Pereira de Melo
- ES Garcia de Orta
- ES da Maia
- ES de Santa Maria da Feira

### Coordenação

- J. M. B. Lopes dos Santos
- Manuel Joaquim Marques

### Portal

URL: `http://www.fc.up.pt/faraday`

## Texto do 11$^{\text{o}}$ Ano

### Redactor Principal

J. M. B. Lopes dos Santos

### Colaboração e revisão

- Elisa Arieiro
- Carlos M. Carvalho
- Manuel Joaquim Marques

# Conteúdo

# Lista de Figuras

# Parte II

# Comunicações

# Capítulo 6

# Comunicações

## 6.1 Descoberta dos Pulsars

Figura 6.1: S. Jocelyn Bell com o telescópio que ajudou a construir e com o qual descobriu os pulsars.

Em Julho de 1967, Jocelyn Bell, uma estudante de doutoramento da Universidade de Cambridge, começou a operar um novo "telescópio" que tinha ajudado a construir nos dois anos anteriores. O telescópio era, na realidade, constituído por mais de 1000 postes, com quase 200 km de fios a ligá-los. Mais propriamente, era um enorme complexo de antenas, ocupando uma área de quase dois campos de futebol e destinado a captar sinais de rádio vindos das estrelas (a uma frequência de 81,5 MHz).

No Outono de 1967, ao analisar os registos em papel (eram produzidos cerca de 120 metros de papel por cada varrimento do céu, que demorava quatro dias), Jocelyn Bell notou uns aumentos de intensidade do sinal, bruscos e de muito curta duração (picos), que se repetiam regularmente, separados de cerca de 1,3 s. O que seria? Um sinal humano, vindo de outro ponto da Terra?

Jocelyn Bell e o seu supervisor, Anthony Hewish, puseram essa hipótese de lado quando verificaram que o sinal se repetia, não à mesma hora todos os dias, mas à mesma hora sideral. Isto é, quando a Terra tinha feito uma rotação completa em relação às estrelas distantes, não em relação ao Sol. O sinal só poderia vir das estrelas (ou de outros astrónomos terrestres, que se guiassem pelo tempo sideral). Desconhecendo qualquer fenómeno estelar que pudesse dar origem a um período da ordem de um segundo, Anthony Hewish e Jocelyn Bell, puseram a hipótese que pudesse ser um sinal vindo de outra civilização e baptizaram-no LGM1 (**L**ittle **G**reen **M**an 1). Contudo, pouco depois, Jocelyn Bell detectou mais duas fontes do mesmo tipo (com períodos mais curtos, noutras regiões do céu). Não era crível que se pudessem encontrar mais civilizações extra-terrestres com tanta facilidade. Os resultados destas observações foram publicados da revista *Nature* e constituíram a primeira observação de pulsars.

Um pulsar é uma estrela constituída por neutrões. Na matéria habitual existem protões e neutrões, que formam o núcleo, e electrões. Em estrelas suficientemente massivas, a atracção gravítica, pode "esmagar" os átomos, empurrando os electrões para núcleo. Os protões capturam os electrões e transformam-se em neutrões. A estrela de neutrões é, pois, semelhante a um enorme núcleo. Apesar de poder ter um raio de apenas $10 \sim 15\,\mathtt{km}$, a sua massa é superior à do Sol. Um pulsar é uma estrela de neutrões em rotação. Emite radiação na direcção dos seus pólos magnéticos. Ao rodar, o seu feixe de radiação roda no espaço, um pouco como o sinal de um farol. Os sinais detectados em Cambridge correspondiam à passagem do feixe pela Terra.

**Exercício**: O núcleo do átomo de hidrogénio (protão) tem um raio de cerca de $10^{-15}\,\mathtt{m}$. Contudo, tem quase toda a massa do átomo. Um estrela de raio $15\,\mathtt{km}$ e com uma massa volúmica igual à do núcleo do hidrogénio, que massa terá?

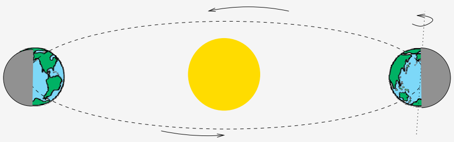
A massa volúmica do protão é

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{m_p}{V} = \frac{m_p}{4\pi R^3/3} \\ &= \frac{1{,}7 \times 10^{-27}}{4{,}2 \times 10^{-45}} = 0{,}4 \times 10^{18}\,\mathtt{kg\,m^{-3}}.\end{aligned}$$

Para um raio $R = 15 \times 10^3\,\mathtt{m}$ e a mesma massa volúmica, a

## ■ Tempo sideral ■

Suponhamos, por um momento, que a Terra não girava em volta do seu eixo. Pelo facto de orbitar em torno do Sol, o hemisfério iluminado numa certa altura do ano estaria escuro passados seis meses. Isto é, mesmo que a Terra não rodasse em torno do seu eixo relativamente às estrelas, haveria um nascer e um pôr do Sol por ano, em qualquer ponto da Terra, por causa da sua órbita. Contudo, o movimento aparente do Sol seria do Oeste para Leste.



Mesmo sem rotação da Terra em torno do seu eixo, haveria um nascer e um pôr-do-sol todos os anos. Mas o movimento aparente do Sol seria o oposto ao que resulta do movimento de rotação da Terra.

De facto, a Terra roda em torno do seu eixo com o mesmo sentido com que orbita em torno do Sol. O resultado é que num período orbital, um ano, há menos um nascer e pôr do sol do que rotações em torno do seu eixo. Ou seja, relativamente às estrelas há mais um dia por ano do que relativamente ao Sol. Cada ano sideral (relativamente às estrelas) tem 366,3 dias e não 365,3 como o ano solar; cada dia sideral tem menos de 24 horas, mais precisamente:

$$\frac{24 \times 365{,}3}{366{,}3} = 23{,}93\,\texttt{h}.$$

O dia sideral é mais curto que o dia solar em cerca de 4 minutos. Jocelyn Bell e Anthony Hewish repararam que os sinais dos pulsares se repetiam, não à mesma hora terrestre, mas quatro minutos mais cedo em cada dia (quando a Terra repetia a sua orientação relativamente às estrelas).

Caixa 6.1: Diferença entre tempo solar e sideral.

massa será:

$$M = \rho \frac{4\pi \left(1{,}5 \times 10^4\right)^3}{3} = 5{,}7 \times 10^{30}\,\mathtt{kg}.$$

A massa do Sol é $2 \times 10^{30}\,\mathtt{kg}$.

### 6.1.1 Sinais, mensagens e comunicações

A história da descoberta dos pulsars permite-nos levantar um sem número de questões.

O "telescópio" de Cambridge era uma antena que tanto podia captar sinais de rádio de uma estação terrestre, como detectar um objecto remoto situado noutro ponto da nossa galáxia. Ou seja, os fenómenos físicos envolvidos na detecção são, em ambos os casos, semelhantes. Tão semelhantes que, num primeiro momento, houve dúvidas sobre qual tinha sido detectado.

Que fenómeno físico constitui o "sinal"? Que significado tem a respectiva frequência?

O que distingue um "sinal" de uma "mensagem"?

O sistema de telemóveis usa também radiação electromagnética, tal como a que foi detectada no telescópio de Cambridge, com frequências entre os 890 e 960 `Mhz`. No entanto, usamo-los para transmitir mensagens escritas, voz, ou mesmo imagens. Como transmitimos informação de natureza tão diversa através dos mesmos dispositivos?

Como é que estes "sinais" se transmitem? O que é que realmente é transmitido?

Os sinais captados pelos telemóveis têm origem nas antenas de retransmissão do sistema de comunicações móveis. O sinal detectado pelo telescópio de Cambridge teve origem numa estrela de neutrões a milhares de anos-luz. O *Deep Space Probe* da NASA detecta as transmissões da *Voyager,* cujo emissor de rádio tem a potência de uma lâmpada, a 13 500 milhões de quilómetros.

Por outro lado, estamos equipados com sistemas de detecção e produção de som (audição e sistema vocal) que nos permitem comunicar a curtas distâncias, sem qualquer mediação tecnológica. O que é o som? Como se transmite? Tem alguma relação com a radiação electromagnética, de que temos vindo a falar?

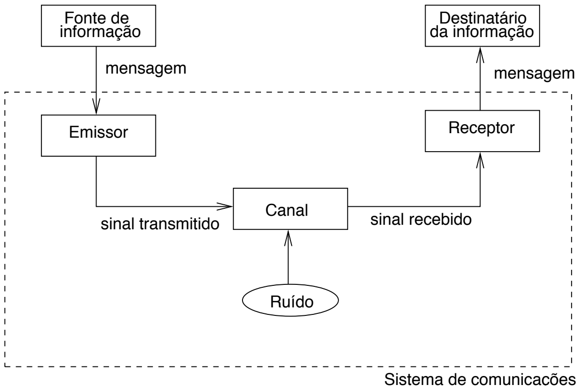



Figura 6.2: Um sistema típico de comunicações.

#### 6.1.1.1 Sistema de comunicações

Suponhamos que que há um grupo de alunos *realmente* interessados no que o professor está a dizer durante uma aula. À sua volta, alguns colegas, menos interessados, conversam entre si.

O professor tenta transmitir uma **mensagem**. O seu sistema vocal é o **emissor** do **sinal**. O sistemas auditivos dos alunos interessados são os **receptores.** As conversas dos colegas, introduzem **ruído** no canal. O som em si, seja sinal ou ruído, consiste em variações de pressão do ar, que conseguimos induzir com o nosso aparelho vocal e detectar com o nosso aparelho auditivo. Essas variações de pressão propagam-se através do ar da sala, que constitui o **canal de comunicação**. Para que haja uma **mensagem**, os sons produzidos no emissor, são escolhidos de um conjunto restrito que os destinatários da mensagem conhecem antecipadamente (sons da língua portuguesa); podemos mesmo falar de um conjunto (potencialmente infinito) de mensagens possíveis, pré-existente, de que o professor escolhe uma, transmitindo por esse facto **informação**. Por exemplo, de todos os objectivos possíveis para o próximo teste, quais foram os escolhidos pelo professor?

Para transmitir informação, o professor **codifica** a mensagem em sons (variações de pressão do ar), usando a sua voz. O sinal detectado pelo sistema auditivo de cada aluno, é descodificado nos seus cérebros, e a mensagem é recuperada (se o ruído não for excessivo).

O que acabamos de descrever é o esquema típico de um sistema de comunicação. Como vemos, a Natureza já nos dotou com um sistema de comunicação muito eficaz, sem o qual a humanidade não teria podido criar uma cultura, isto é, construir sobre o conhecimento de gerações anteriores, sem ser por herança genética. Os

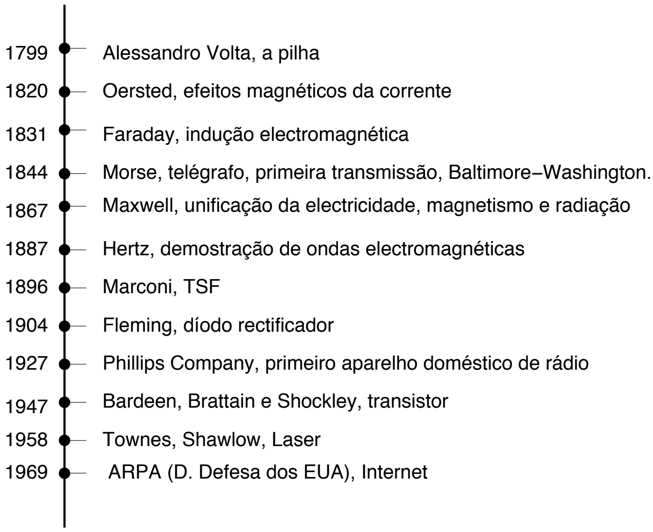



Figura 6.3: Descobertas fundamentais de Física e desenvolvimentos em telecomunicações acompanharam-se ao longo dos anos.

sistemas tecnológicos que hoje usamos contêm os mesmos elementos fundamentais (Fig. 6.2):

- fonte de informação;
- emissor;
- canal de transmissão (normalmente com ruído);
- receptor;
- destinatário da informação.

#### 6.1.1.2 A Física e as comunicações

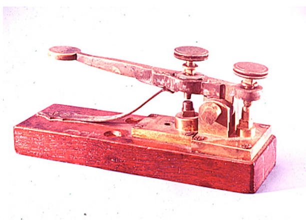


Figura 6.4: Chave de transmissão telegráfica de S. Morse, 1845, National Museum of American History.

Os sistemas de comunicação biológicos, baseados no sistema auditivo ou visual, só são utilizáveis a curtas distâncias (às vezes não tanto como desejaríamos, como quando ouvimos a conversa de vizinhos através de paredes sem isolamento sonoro). O desenvolvimento de sistemas eficazes de longo alcance esteve estreitamente ligado a desenvolvimentos importantes da Física.

- A capacidade de gerar e medir **corrente eléctrica**, possibilitou o **telégrafo**. Usando o que é no essencial um interruptor (**a chave do telégrafo**), um operador de telégrafo gera correntes de maior ou menor duração num circuito eléctrico. Essas correntes são detectadas noutro ponto do circuito.

Samuel Morse criou um sistema de codificação do alfabeto em sequências de sinais curtos (pontos) e sinais longos (linhas), usado para codificar mensagens como sinais de corrente eléctrica.

Figura 6.5: Primeiro rádio da Phillips, 1927.

- A capacidade de gerar e detectar **ondas electromagnéticas**, conduziu à telegrafia sem fios (TSF), aumentando as distâncias a que era possível transmitir e permitindo a comunicação com alvos móveis como os navios.

- A invenção do **díodo**, tornou possível uma codificação e descodificação de sinais eléctricos muito mais rica, permitindo, por exemplo, a codificação e descodificação de sons e conduzindo à vulgarização do rádio.

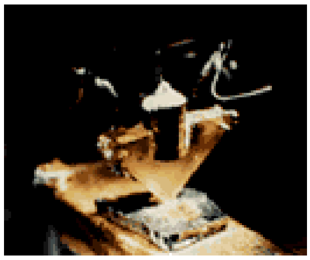


Figura 6.6: Primeiro transistor de estado sólido. A sua descoberta, em 1947, marca o início da revolução da electrónica.

- Os desenvolvimentos posteriores na área dos **semi-condutores** permitiram tornar os sistemas cada vez mais eficientes e portáteis, de tal modo que hoje é quase possível perder um telefone no bolso.

- As **fibras ópticas** e os **lasers**, permitiram aumentar enormemente a capacidade de transmissão dos sistemas de comunicação. Em breve, os sistemas de televisão poderão transmitir conteúdos diversificados à medida do gosto e capricho de cada um dos utentes.

Em suma, a informação não existe, nem se transmite, senão como um fenómeno físico (som, luz, ondas de rádio, corrente eléctrica). Por isso, os desenvolvimentos dos sistemas de comunicação estão fortemente dependentes da nossa compreensão do modo como são produzidos, detectados, transmitidos e transformados, fenómenos como o som, a radiação electromagnética, a corrente eléctrica, etc.

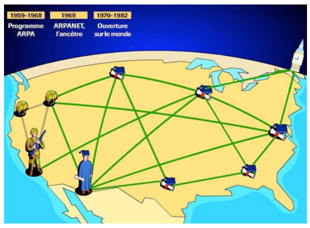



Figura 6.7: A internet foi desenvolvida pelo projecto ARPA do Departamento de Defesa dos estados Unidos. A primeira rede de computadores funcionou em 1969.

## 6.2 Actividades, Questões e Problemas

### 6.2.1 Actividades

6.1. Pesquisar na *web*, ou numa boa enciclopédia, a história das telecomunicações. Identificar três desenvolvimentos ou descobertas da Física que tenham sido importantes nas telecomunicações e escrever um texto de duas páginas relacionando-as com progressos em telecomunicações.

6.2. Pesquisar o alfabeto do código Morse e escrever o nome **Morse** em código Morse, usando traços e pontos marcados numa folha (a primeira transmissão foi, precisamente, registada por sulcos em papel). Usando uma lanterna, transmitir uma mensagem curta em Morse ao resto da turma. Verificar se foi entendida com sucesso.

6.3. Ao carregar um telemóvel numa caixa multibanco, chegamos a receber a mensagem de carregamento antes de finalizar a transacção. Tentar listar os dispositivos e máquinas por que passa a mensagem até chegar ao nosso telemóvel.

6.4. Descrever as partes principais de um sistema de comunicações.

# Capítulo 7

# O Som

*O som é uma onda de pressão que se propaga na atmosfera a* $340\,\mathsf{m\,s^{-1}}$.

Que quer isto dizer? O que é uma onda? O que é a velocidade de uma onda? O que é que viaja quando o som se propaga? Por que é que se propaga?

Comecemos por explorar o conceito de onda com um exemplo muito simples.

## 7.1 O que é uma onda

### 7.1.1 Onda no semáforo

Para compreender alguns conceitos relacionados com ondas vamos imaginar uma experiência simples. Suponhamos que observamos de longe uma longa fila de carros, parados num semáforo. Cai o verde e os carros põem-se em movimento, parando umas dezenas de metros à frente noutro sinal vermelho.

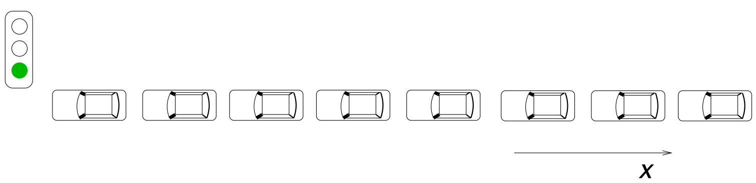



Figura 7.1: Uma onda num semáforo. Quando o sinal passa a verde, o "movimento dos carros" propaga-se para trás na fila.

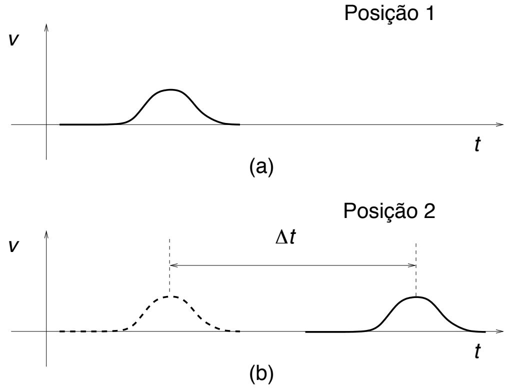



Figura 7.2: Uma onda num semáforo. $v(t)$ é a velocidade dos carros de uma fila que arranca e volta a parar em sinais de trânsito. Os gráficos (a) e (b) correspondem a posições diferentes na fila.

Sabemos bem que os carros não se movem todos aos mesmo tempo. Todos temos a experiência de esperar impacientemente que o "movimento dos carros" chegue até nós, depois de vermos o sinal mudar. Embora os carros viajem para a frente, este "movimento" propaga-se no sentido oposto, da frente da fila para trás. Quanto mais longa for a fila, mais terão que esperar os carros de trás antes de iniciarem o movimento.

Se olharmos de longe para **uma posição da fila**, podemos caracterizar o movimento dos carros nessa posição. Podemos até pensar que estamos a observar uma pequena secção da fila com uns binóculos fixos: não vemos os carros nem atrás nem à frente dessa secção.

Inicialmente, a velocidade na posição observada é nula: os carros estão parados. Quando os carros imediatamente à frente se começam a mover, a velocidade na posição observada aumenta também. Durante um certo tempo vemos carros a passar com uma dada velocidade. Entretanto, verifica-se a paragem da fila; a paragem propaga-se também para trás e acabamos por ter velocidade nula na posição observada. Em resumo, um gráfico de velocidade em função do tempo, numa posição fixa, teria o aspecto do da figura 7.2a.

Se estivéssemos a olhar para um outro ponto mais atrás na fila, veríamos algo semelhante, mas um pouco mais tarde. O gráfico teria o aspecto do da figura 7.2b.

Chamemos $v_1(t)$ à função representada no gráfico da figura 7.2a: é a velocidade em função do tempo na posição **1**. Suponhamos que o atraso era $\Delta t = 20\,\mathtt{s}$. No instante $t = 20\,\mathtt{s}$, a velocidade na segunda posição, $v_2$, é o valor de $v_1$ em $t = 0\,\mathtt{s}$; em $t = 21\,\mathtt{s}$ é o valor de $v_1$ em $t = 1\,\mathtt{s}$, etc. Isto é, a velocidade $v_2$ em $t$ é igual à velocidade $v_1$ em $t - 20$:

$$v_2(t) = v_1(t - \Delta t),$$

em que $\Delta t = 20\,\mathtt{s}$ é o tempo que demora o movimento a propagar-se da posição 1 à posição 2. Se distância da posição **1** para **2** for $d$, a **velocidade de propagação da onda** é

$$c = \frac{d}{\Delta t}. \tag{7.1}$$

Se tomarmos a posição **1** como origem do sistema de eixos de coordenadas, com o sentido da figura 7.1, a distância entre as duas posições é $d = \Delta x = x - 0 = x$ e obtemos

$$v_2(t) = v_1(t - \frac{x}{c}).$$

Ou seja, a velocidade de um ponto da fila de coordenada $x$ depende do tempo, $t$, e de $x$ e é dada por uma expressão com a forma

$$v(x,t) = v_1(t - \frac{x}{c}),$$

em que $c$ é a velocidade da onda.

Este exemplo do nosso dia-a-dia encerra várias lições sobre fenómenos ondulatórios.

- *O que se propaga é uma perturbação num sistema que estava em equilíbrio.*

O cair do sinal verde origina o movimento do primeiro carro: este altera o seu estado, acelerando. É *esta alteração de estado que se propaga para trás na fila.*

- *A onda propaga-se porque partes vizinhas do sistema interagem.*

Com efeito, quando o segundo condutor vê o primeiro carro a mover-se, começa também o movimento, o que por sua vez causa o movimento do terceiro carro e assim sucessivamente. O estado de cada parte do sistema depende das partes vizinhas.

- *As interacções são locais: cada parte só interage com as partes vizinhas.*

Cada condutor só vê o carro à sua frente. O condutor do fim da fila não vê o início da mesma e só pode responder quando o sinal se tiver propagado por todos os condutores que estão à sua frente.

- *A velocidade da onda não é a velocidade das "partículas" cujo movimento a constitui.*

Neste caso trata-se de uma onda de movimento de automóveis. Mas os automóveis e a onda deslocam-se em sentidos opostos. Com efeito, a velocidade da onda é totalmente independente da velocidade dos automóveis. É mesmo muito fácil calcular a velocidade da onda, como mostra o seguinte exercício.

> **Exercício**: Suponhamos que entre cada condutor há uma distância fixa de $5\,\mathtt{m}$, que estão todos muito atentos e têm um tempo de reacção de $0{,}5\,\mathtt{s}$. Qual é a velocidade da onda?
>
> Cada condutor repete o movimento do que está à sua frente com um atraso de $0{,}5\,\mathtt{s}$, cinco metros mais atrás. Isso significa que a perturbação se propaga $5\,\mathtt{m}$ em meio segundo. Logo, a velocidade da onda é
>
> $$c = \frac{5}{0{,}5} = 10\,\mathtt{m}\,\mathtt{s}^{-1}.$$
>
> O exemplo dado acima ($\Delta t = 20\,\mathtt{s}$) corresponde a uma distância de $\Delta x = 200\,\mathtt{m}$. Repare-se que não dissemos nada sobre velocidade dos automóveis. Sejam Ferraris ou carros de bois, se o tempo de reacção e a distância entre veículos forem os mesmos, a onda propaga-se à mesma velocidade.

- *Uma função da coordenada $x$ e do tempo $t$, com a forma*

$$v(x,t) = f(t - \frac{x}{c})$$

*representa uma onda que se propaga sem alteração de forma no sentido positivo do eixo $Ox$ com velocidade $c$.*

> **Exercício**: Como podemos descrever uma onda que se propaga no sentido negativo do eixo $Ox$?
>
> Podemos repetir o raciocínio que fizemos atrás a propósito da fila de carros, usando o eixo $Ox$ no sentido oposto, de

trás para a frente da fila. Nesse caso a distância entre a posição 1 e 2 seria

$$d = |\Delta x| = |x - 0| = -x$$

pois $x < 0$ ( $x$, é a coordenda da posição 2, atrás da posição 1). Então

$$c = \frac{d}{\Delta t} = -\frac{x}{c}$$

e

$$v(x,t) = v_1(t + \frac{x}{c}).$$

Note-se que a velocidade de propagação da onda, tal como foi definida, é sempre positiva.

### 7.1.2 Geração e propagação do som

Terá o exemplo anterior alguma coisa a ver com o fenómeno do som? Como é gerado o som?

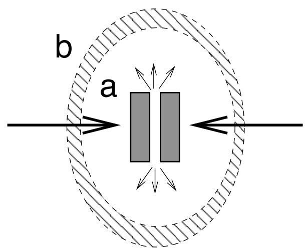



Figura 7.3: Quando batemos duas placas uma contra a outra, a pressão aumenta na região à volta.

Quando batemos palmas ou batemos com duas placas de madeira, o ar que está entre as mãos ou entre as placas é expelido para o exterior, deslocando-se para a zona à volta. Resultado: a pressão na região próxima aumenta bruscamente. Criamos uma **perturbação** local de pressão. O ar que estava em equilíbrio deixou de estar.

Atentando na figura 7.3, podemos ver que a expulsão do ar entre as placas aumenta a pressão na região **a** onde passa a ser superior à da região **b**, mais exterior. A pressão é uma força por unidade de área. Como a pressão é maior em **a** do que em **b**, a camada de ar entre elas (sombreada) fica sujeita a uma força e acelera para o exterior: a região **a** expande-se e a região **b** é comprimida. A pressão diminui em **a** com esta expansão, mas aumenta em **b**. As forças de pressão entre camadas de ar adjacentes são **interacções entre camadas vizinhas** e dão origem, então, à propagação da perturbação de pressão para distâncias sucessivamente crescentes das placas: temos uma onda sonora a propagar-se a partir destas.

Como vemos, são movimentos rápidos de corpos que provocam estas perturbações de pressão no ar; as diferenças de pressão de ponto para ponto originam forças e deslocamentos no ar, que propaga, deste modo, a perturbação inicial. Por sua vez, outros corpos pode ser postos em vibração e detectar o som. Por exemplo, no nosso sistema auditivo variações de pressão de ar põem em movimento o tímpano e alguns ossos minúsculos que o transmitem às células ciliadas do ouvido interno, dando origem aos sinais nervosos, que o nosso cérebro transforma em sensações auditivas.

▷ **Células ciliadas**: células com pequenos pelos (cílios) existentes dentro da cóclea, uma bolsa com líquido no ouvido interno.

Na actividade 7.1 medimos a velocidade do som usando o conceito descrito pela equação 7.1. Medimos o valor da pressão $P(t)$ registada em dois microfones separados de uma distância conhecida. O atraso $\Delta t$ entre os dois sinais permite-nos obter a velocidade do som usando a equação 7.1:

▷Actividade 7.1

$$c_s = \frac{d}{\Delta t}.$$

Esta discussão também põe em evidência o seguinte facto: sem atmosfera não há som: os corpos podem vibrar, mas a sua vibração não se transmite através do espaço. Só se pode transmitir através de corpos em contacto directo. Daí que as explosões de naves, ou mesmo Super Novas, no espaço sejam absolutamente silenciosas.

## 7.2 Sinais periódicos

A pressão numa onda sonora depende, não só do tempo, como da posição, conforme vimos. A propagação do som implica que, no mesmo instante, a pressão varia de ponto para ponto.

Por outro lado, a detecção de uma onda sonora consiste na medição de uma variação da pressão em função do tempo, num ponto fixo. Vamos-nos concentrar agora no estudo dessa variação, deixando para mais tarde as questões relacionadas com a variação de $P$ no espaço. Tentaremos, em particular, procurar perceber a relação entre o sinal, pressão em função do tempo $P(t)$, e as qualidades sensoriais do som a que corresponde.

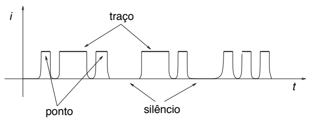


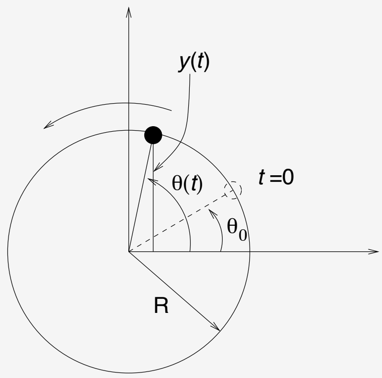

Figura 7.4: O valor de corrente em função do tempo de um sinal em código Morse. Os intervalos mais curtos de corrente não nula são os pontos e os períodos mais longos os traços.

A variação temporal de um sinal também é muito importante em comunicações.

Tomemos o caso do telégrafo como exemplo: o sinal é uma corrente eléctrica, que podemos medir com um amperímetro; mas se medirmos um só valor de corrente, por exemplo, 1 mA, qual foi a mensagem? Contudo, se representarmos o valor de corrente num sinal de telégrafo em função do tempo, obtemos algo semelhante à figura 7.4: cada agrupamento de pontos e traços corresponde a uma letra. A mensagem pode ser reconstituída se conhecermos o valor da corrente $i$ em função do tempo, $t$.

**■ Movimento circular e a função seno. ■**

Estamos habituados a associar o `seno` a um ângulo. Que tem isso a ver com a função sinusoidal?




Existe, com efeito, uma relação entre um sinal harmónico e o movimento circular. Se imaginarmos uma partícula em movimento circular uniforme, de raio $R$, o ângulo descrito num período é $2\pi$ radianos. Então num intervalo de tempo $[0, t]$ temos:

$$\Delta\theta = \theta(t) - \theta(0) = \frac{2\pi}{T} t.$$

Em termos da frequência $f = 1/T$,

$$\theta(t) = \theta_0 + 2\pi f t.$$

A projecção deste movimento segundo o eixo $Oy$ dá

$$y(t) = R\text{sen}\,(\theta(t)) = R\text{sen}\,(\theta_0 + 2\pi f t)$$

que tem precisamente a forma de um sinal harmónico. No portal do projecto Faraday encontra-se um `gif` animado que ilustra esta relação.

Caixa 7.1: Relação entre movimento circular e função seno.

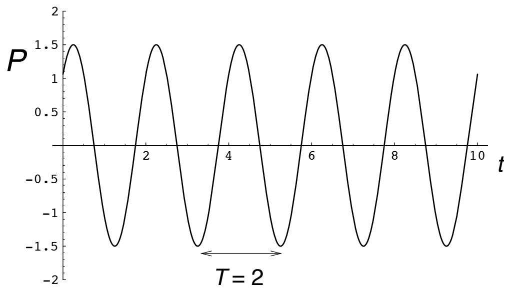



Figura 7.5: Um sinal harmónico, ou sinusoidal, de período $T = 2$ e amplitude $A = 1{,}5$, representado entre $t = 0$ e $t = 10$.

### 7.2.1 Sinais sinusoidais

Os **sinais sinusoidais**, também designados como **sinais harmónicos,** como o representado na figura 7.5, têm uma importância central quer em física quer em telecomunicações. Por duas razões[1]:

▷ Actividade 7.2

- é extremamente fácil dispor de sistemas que geram sinais sinusoidais. Por exemplo, se pendurarmos uma massa numa mola e usarmos um sensor de movimento para medir a sua posição em função do tempo, obtemos um gráfico semelhante ao da figura 7.5. Qualquer sistema que vibre próximo de uma posição de equilíbrio, pode fazê-lo com variações sinusoidais das grandezas que o caracterizam (deslocamento, velocidade, pressão, etc.).

- Muitos sistemas de comunicações utilizam modificações (**modulação**) de sinais sinusoidais para codificar a informação que se deseja transmitir.

O sinal representado na figura 7.5 é caracterizado pelos seguintes parâmetros:

- o **período**: o valor da função repete-se ao fim de intervalo de tempo $T = 2$. Isto é,

$$P(t) = P(t + T) \qquad (T = 2),$$

  para qualquer valor de $t$.

[1]Na realidade, por três razões. A terceira será discutida na secção 7.2.2.

- a **frequência** é um parâmetro relacionado com o período. Define-se como o número de oscilações completas por segundo, ou seja, o número de períodos por segundo.
  Se o período for $T = 0{,}5\,\mathtt{s}$, teremos $f = 2\,\mathtt{Hz}$; no caso da figura 7.5 $T = 2\,\mathtt{s}$, o que signica que há meia oscilação por segundo, $f = 0{,}5\,\mathtt{Hz}$ (meio período em cada segundo). De um modo geral:
  $$f = \frac{1}{T}.$$
  (Se um período dura $T$ segundos, o número de períodos por segundo é $1/T$).

- A **amplitude**, $A$; O sinal tem valores que oscilam entre $-1{,}5$ e $1{,}5$. A amplitude é $A = 1{,}5$.

- a **fase inicial**, $\theta$: determina o valor da função no instante $t = 0$.

Matematicamente, um sinal sinusoidal pode ser representado pela função `seno`:

$$P(t) = A\,\mathrm{sen}(2\pi f t + \theta)$$

Na actividade 7.2 explora-se o efeito de variação destes três parâmetros, $f$, $A$ e $\theta$ no gráfico de um sinal sinusoidal.

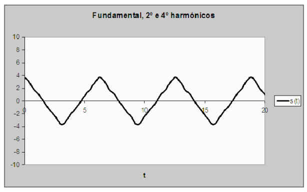



Figura 7.6: Um sinal construído com três sinusóides de frequências $f_0$, $3f_0$ e $5f_0$ (ver actividade 7.2).

### 7.2.2 Espectro de um sinal

Na actividade 7.2, verificámos que era possível compor uma grande variedade de sinais periódicos somando sinais sinusoidais com amplitudes e fases variáveis. O exemplo da figura 7.6 corresponde à função:

$$P(t) = a_0 \mathrm{sen}\left(2\pi f_o + \theta_0\right) + a_3 \mathrm{sen}\left(6\pi f_0 + \theta_3\right) + a_5 \mathrm{sen}\left(10\pi f_0 + \theta_5\right) \tag{7.2}$$

com

$$\begin{aligned} a_0 &= 3{,}17; \\ a_3 &= 0{,}33; \\ a_5 &= 0{,}17; \\ \theta_0 = \theta_3 = \theta_5 &= \pi/2. \end{aligned}$$

Este sinal é composto apenas por sinusóides com as frequências $f_0$, $3f_0$ e $5f_0$. No CD `Sons`, na pasta `sinais_sintese` existe um ficheiro de som `triang_3harm.wav`, que contém um sinal de

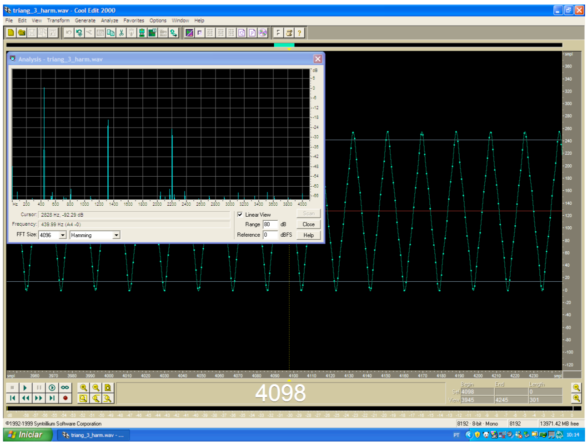



Figura 7.7: Espectro do som do ficheiro `triang_3harm.wav`. Note-se que só existe intensidade significativa às frequências de 440 Hz, $3 \times 440 = 1330$ Hz e $5 \times 440 = 2200$ Hz, precisamente as frequências das sinusóides cuja soma gerou o sinal sonoro em análise.

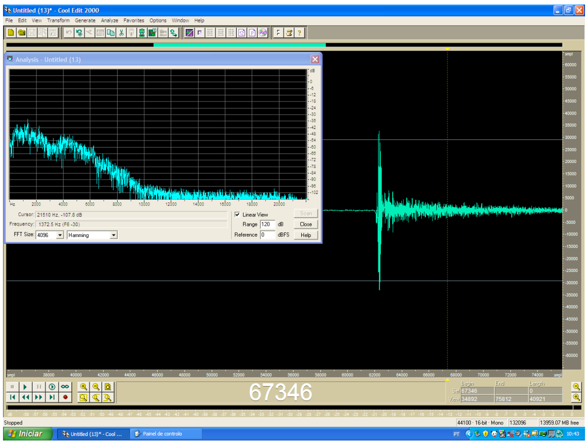



Figura 7.8: Espectro de frequências de um bater de palmas. Neste caso, o espectro apresenta intensidade sigificativa a todas as frequências entre 0 e 10 kHz; é um espectro contínuo.

som gerado de acordo com a equação 7.2, usando $f_0 = 440\,\mathtt{Hz}$. Na mesma actividade inspeccionou-se o espectro de frequências desse som (fig. 7.7).

Vimos que no **espectro** do sinal aparecem picos de intensidade nas frequências das sinusóides cuja soma deu origem ao som em análise. Mais ainda, verificámos que a intensidade era mais elevada na frequência fundamental, $f_0$, diminuindo para $3f_0$ e, ainda mais, para $5f_0$, *exactamente como as amplitudes* $a_0$, $a_3$ e $a_5$.

Começamos a ver que há duas maneiras de caracterizar um sinal sonoro:

**a)** Podemos representar a pressão em função do tempo, $P(t)$;

**b)** Em alternativa, podemos caracterizar o sinal sonoro através da sobreposição (soma) de sinais sinusoidais, identificando as frequências que o compõem e as respectivas amplitudes. O espectro de frequências dá-nos, precisamente, a distribuição de intensidade do sinal por cada frequência.

É um resultado notável, atribuído ao físico francês Joseph Fourier, que **qualquer som**, $P(t)$, **pode ser representado como soma de sinais sinusoidais**.

Esta representação é possível mesmo para sons como um pancada, ou uma explosão, que não são periódicos, e que podem ter uma duração curta. Um espectro de frequências de um bater de palmas está representado na figura 7.8. Ao contrário do que se verifica para um sinal periódico, há uma intensidade distribuída por todas as frequências desde $0\,\mathtt{Hz}$ a cerca de $10\,\mathtt{kHz}$: é um espectro contínuo.

#### 7.2.2.1 Espectros de riscas e espectros contínuos

Já encontrámos no 10º ano o conceito de espectro de frequências, quando discutimos a radiação. Nessa altura introduzimos a ideia que a energia da radiação electromagnética se podia distribuir por uma gama contínua de frequências. No caso da radiação solar, por exemplo, tinhamos uma distribuição com um máximo a uma frequência dada pela lei de Wien. No caso de um átomo o espectro só tem intensidade significativa a certas frequências: espectro de riscas.

É exactamente este conceito que reencontramos agora a propósito do som. Um sinal periódico tem intensidade apenas em certas frequências: espectro de riscas. Mas um som como uma pancada ou um bater de palmas tem um espectro com intensidade numa gama contínua de frequências: espectro contínuo. Esta distribuição de intensidade em frequência traduz o facto de o sinal (sonoro ou de radiação) se poder exprimir como soma de sinusóides.

▷ Actividade 7.3.

Na actividade 7.3 explora-se o interesse do espectro de frequências no reconhecimento de voz.

## 7.3 Modulação

### 7.3.1 Amplitude e Frequência modulada

Quando sintonizamos uma estação de rádio, precisamos de saber se é `AM` ou `FM`. Depois temos que sintonizar a respectiva frequência. No caso de `AM`, estas variam entre 500 `kHz` e 1 600 `kHz` = 1,6 `MHz`; para `FM`, são mais altas, entre 88 `MHz`e 108 `MHz`.

▷ O quilo-hertz, `kHz`, são $10^3$ `Hz`; o mega-hertz, `MHz`, são $10^6$ `Hz` (um milhão de ciclos por segundo).

Que quer isto dizer? Quando estamos a ouvir uma estação nos 92,5 `MHz`, estamos a receber um sinal sinusoidal com esta frequência? E que querem dizer as siglas `AM` e `FM`?

Não é complicado perceber que um sinal periódico não pode conter informação. Se o sinal tem uma frequência de 100 `MHz`, por exemplo, repete-se, exactamente, cada $10^{-8}$ segundos. Nada de novo chega ao fim de um centésimo de milionésimo de segundo! Claramente, um tal sinal não pode transmitir a informação contida numa canção ou numa conversa. Na actividade 7.2 pudemos confirmar isso mesmo, ouvindo o som produzido por sinais periódicos.

▷ Actividade 7.4

Os processos de modulação de amplitude, `AM` (**A**mplitude **M**odulation) e modulação de frequência, `FM` (**F**requency **M**odulation) consistem em variar no tempo, lentamente, os parâmetros de um sinal sinusoidal: a amplitude, $A$, no caso de `AM` e a frequência $f$, no caso de `FM`. A informação que se deseja transmitir está codificada na variação temporal de $A$ (`AM`) ou de $f$ (`FM`). Por exemplo, se queremos transmitir som, variamos a amplitude, $A$, ou a frequência, $f$, de acordo com o sinal de pressão $P(t)$ que queremos transmitir. A frequência que sintonizamos no rádio diz respeito ao sinal sinusoidal que é modulado, e chama-se **frequência transportadora.** Estes processos são considerados em mais detalhe na Actividade 7.4.

Mas por que se torna necessário usar a modulação? Por que razão não transmitimos simplesmente o sinal modulador?

Uma das razões tem a ver com o espectro do sinal. Consideremos o caso dos sinais auditivos (voz, música, etc.). Só conseguimos ouvir sinais com frequências entre 10 Hz e os 20 kHz. Mostra-se que, usando um sinal com esta banda de frequências para modular em amplitude um sinal de 1 MHz, o sinal modulado tem toda a sua potência na banda compreendida entre os 980 MHz aos 1 020 kHz. Variando a frequência portadora desde os 500 kHz aos 1500 kHz da Amplitude Modulada, podemos dispor de 25 bandas que não se sobrepoem[2]. A sintonização do rádio consiste na escolha da banda de frequências vai ser amplificada pelos seus circuitos internos. Deste modo é possível ter sinais de várias estações a serem emitidos em simultâneo, sem qualquer interferência mútua. No caso da frequência modulada, verifica-se algo semelhante: o espectro do sinal modulado só tem componentes significativas numa banda de frequências à volta da frequência transportadora.

▷Actividade 7.5

### 7.3.2 Sistemas Digitais

Os sistemas de modulação AM ou FM são exemplos de sistemas **analógicos**: a variação contínua no tempo de um grandeza física é produzida no emissor e reproduzida no sistema receptor. Os sistemas **digitais** são cada vez mais frequentes.

O modo como representamos o gráfico de uma função num computador ou numa calculadora dá uma boa imagem do que é um sistema digital.

Nenhum computador pode ter gravados os todos os valores de uma função do tempo, $f(t)$; nem sequer num intervalo finito. Basta pensar que existe uma infinidade de números reais em qualquer intervalo, por exemplo $[0, 10]$. Na realidade, o computador apenas calcula valores de $f$ num conjunto de instantes finitos, por exemplo, de segundo a segundo: $t = 0,\ 1,\ 2\ \ldots$. No intervalo de tempo $[0, 10[$ teríamos apenas 10 valores registados, $t = 0,\ 1,\ 2\ \ldots$, até $t = 9$. Chama-se a este processo a **amostragem** da função $f(t)$ (Fig. 7.9(a)).

Por outro lado, o valor de $f$ em cada instante não pode ser especificado com precisão infinita, já que isso pode requerer uma parte decimal infinita. Suponhamos, por exemplo, que a função toma valores no intervalo $[0, 10[$. Se especificarmos uma precisão de uma casa decimal, a representação de um valor de $f$ está limitada a 100

[2]Na realidade, com tratamento apropriado do sinal, é possível reduzir a banda do sinal modulado a cerca de metade. O número de bandas distintas em AM é pois o dobro do que dissemos.

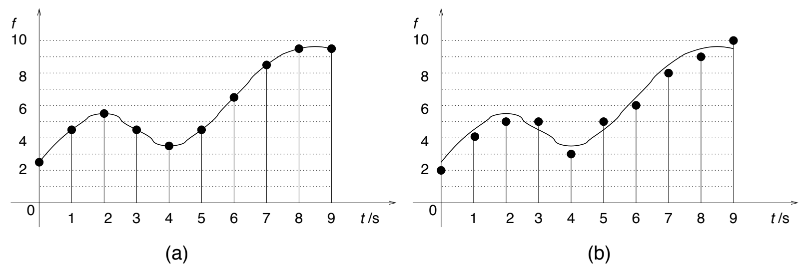



Figura 7.9: Pelo processo de amostragem (a) e quantificação (b), esta função fica representada dez números $f_i$ que são os valores de $f(t)$ em $t = 0, 1, 2, \ldots, 9$ aproximados à unidade. Se os valores de $f$ estão no intervalo $[0, 10]$ teremos apenas um total de 110 funções possíveis.

valores possíveis (de 0,0 a 9,9). Por exemplo, se $f(5) = 3{,}14$, temos $3{,}1 < f(5) < 3{,}2$ e podemos aproximar a função por 3,1. A este processo chama-se **quantificação** (Fig. 7.9(b) ).

O resultado destes dois processos é que a representação da função fica completamente especificada por um conjunto de números tirados de um conjunto finito. No caso da figura 7.9, em que amostramos a função em 10 instantes e temos 11 valores de quantificação, só existem 110 funções possíveis. É muito mais fiável transmitir uma mensagem que tem um número de valores possíveis finito. Para compreender isto, imaginemos alguém que nos grita uma palavra de longe. Se soubermos que nos está a dizer ou **"Sim"** ou **"Não"**, será muito mais fácil perceber o que disse e dificilmente nos enganaremos a interpretar a sua mensagem.

Podemos aplicar este processo a um sinal físico. Chama-se a esta operação **digitalização**. Naturalmente, uma amostragem em 10 pontos com 11 níveis de quantificação não é, em geral, suficiente. Mas, se os intervalos de tempo entre amostras e os intervalos de quantificação forem suficientemente pequenos, o sinal digital é suficiente para permitir a reconstrução do sinal original, para todos os efeitos práticos. O programa `CoolEdit`©, por exemplo, digitaliza sinais sonoros com uma taxa de 44100 amostras por segundo. Na transmissão de um sinal digital transmitimos um conjunto símbolos discreto e é mais fácil garantir uma transmissão sem erros.

Seja como for, nos sistemas de comunicação nunca passam números, caracteres ou imagens: passa radiação electromagnética, variações de pressão, de corrente eléctrica, etc. Passa Física!

## 7.4 Actividades, Questões e Problemas

### 7.4.1 Actividades

7.1. **Medição da velocidade do som**
Ver ficha de actividade A29.

7.2. **Sinais harmónicos e a sua composição**
Ver ficha de actividade A30.

7.3. **Análise de voz**
Ver ficha de actividade A31.

7.4. **Modulação `AM` e `FM`.**
Para realizar esta actividade é necessário dispor de um computador com a aplicação Microsoft Excel©. Abrir o ficheiro `modulacao.xls` (CD `Sons`, pasta `fich_excel`) e seguir as instruções nele contidas.

7.5. **Espectro de modulação `AM` e `FM`.**
Usando o `CoolEdit`©, abrir os ficheiros da pasta `modulacao_am_fm` e visualizar os respectivos espectros. Estes ficheiros correspondem aos seguintes parâmetros:

| Nome ficheiro | Frequência Portadora | Frequência moduladora | Amplitude modulação |
|---|---|---|---|
| `amf440mf60amp05.wav` | 440 Hz | 60 Hz | 0,5 |
| `fmf440mf60amp20.wav` | 440 Hz | 60 Hz | 20 Hz |
| `fmf440mf60amp60.wav` | 440 Hz | 60 Hz | 60 Hz |
| `fmf440mf60amp110.wav` | 440 Hz | 60 Hz | 110 Hz |