

Projecto Faraday Actividades do 11^o ano

Departamento de Física
Faculdade de Ciências, Universidade do Porto

Fundação Calouste Gulbenkian

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>

Autores

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

Revisão

- Elisa Arieiro

Conteúdo

Ficha Técnica	ii
A18: Análise de movimentos em uma dimensão	5
A19: Análise de movimentos de queda livre	11
A20: Trabalho de forças variáveis	15
A21: Aceleração de um projectil	19
A22: Força e movimento	23
A23: Segunda Lei de Newton	27
A24: Movimentos planetários vistos da Terra	31
A25: Aceleração no movimento circular	35
A26: Aceleração dos Planetas	39
A27: Movimento assistido por gravitação	43
A28: Força centrípeta e velocidade angular	49
A29: Medição da velocidade do Som	55
A30: Sinais Periódicos	59
A31: Análise de Voz	65

Lista de Figuras

1	A distância à parede é metade da distância percorrida pelo som entre a emissão a a recepção do eco: $2L = c_s \Delta t$ (c_s é a velocidade do som).	6
2	Comparar deslocamentos usando uma transparência.	13
3	Se a velocidade for constante, o deslocamento $\Delta x = v_x t$: ou seja, é a área do gráfico de v_x vs t	15
4	Como calcular o deslocamento nestas quatro situações?	16
5	Se $v_x < 0$ o deslocamento é o simétrico da área entre o eixo do tt e o gráfico de v_x	17
6	Quanto vale o deslocamento total entre $t = 0$ e $t = 4$?	18
7	Qual é o deslocamento entre 0 e t ?	18
8	Esquema de montagem experimental.	24
9	Esquema da montagem experimental	28
10	Posições sucessivas de dois planetas ao longo de 24 meses.	31
11	Usar esta figura para desenhar as órbitas relativas dos dois planetas numa transparência.	34
12	As marcas sobre o arco de circunferência representam posições sucessivas de um movimento circular uniforme. O centro da circunferência está sobre o eixo Oy	36
13	A velocidade do planeta rodou entre O e Q . v_y é nula em O e negativa em Q , logo há uma aceleração na direcção do centro da órbita.	40

14	Posições da órbita da Voyager, de 20 em 20 horas, durante o encontro com Júpiter (J), no referencial de Júpiter.	46
15	Posições da órbita de Júpiter de 20 em 20 horas, no referencial do Sol. O sol encontra-se na direcção de x negativo. Neste intervalo de apenas 180 horas, a curvatura da órbita de Júpiter é imperceptível.	47
16	Se a mola em rotação tem comprimento l , a força centrípeta sobre a massa m é $\ \vec{F}\ $	50
17	Mesa giratória PASCO. Nesta experiência a mesa é actuada por um motor regulável (não representado).	51
18	Método de tempo de vôo para medição da velocidade do som.	56
19	Montagem sugerida para medição da velocidade do som.	57
20	Dois sinais obtidos sobrepondo sinusóides de frequência f_0 , $2f_0$ e $3f_0$. Com que fases e amplitudes?	61
21	Três sinais obtidos sobrepondo sinusóides de frequência f_0 , $3f_0$ e $5f_0$. Com que fases e amplitudes?	62
22	Montagem usada para estudo de sinais gerados pela voz humana.	66
23	Espectro do sinal de fundo.	67

Actividade A18	Análise de movimentos em uma dimensão		
<i>Descrição</i>	Exploram-se conceitos de cinemática a partir de medições de posição de carros numa calha.	<i>Versão</i>	1.0
<i>Autores</i>	Projecto Faraday	<i>Data</i>	15/11/2004

Objectivo

Pretende-se consolidar conceitos de cinemática através da análise e discussão de dados de movimento de um carro sobre uma calha, obtidos com um sensor de movimento.

Material

- Calha de alumínio;
- carro de baixo atrito;
- sensor de movimento;
- computador e *software* de aquisição de dados;
- papel milimétrico.

Na preparação desta actividade foi utilizado material PASCO:

- 1 PAScar e calha de alumínio (Ref. ME-9429A);
- 1 sensor de movimento PASport (ref. PS-2103);
- 1 USB-link (ref. PS-2100);
- software *DataStudio*, (ref. CI-6870C).

Para um introdução à aplicação *DataStudio* ver [2].

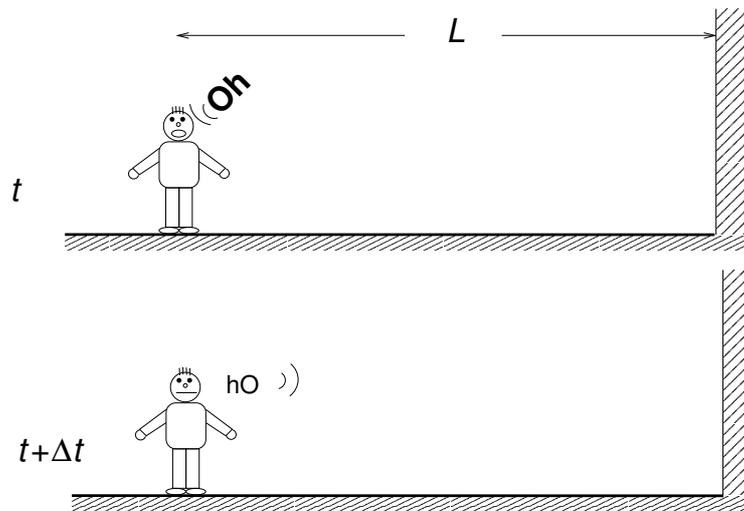


Figura 1: A distância à parede é metade da distância percorrida pelo som entre a emissão a a recepção do eco: $2L = c_s \Delta t$ (c_s é a velocidade do som).

Sensores de movimento

Esta experiência envolve a medição de posição de um carro sobre uma calha, usando sensores de movimento. Como funciona este processo de medição?

Imaginemos que estamos próximo de uma montanha ou de uma parede que reflecte o som. Se batermos palmas, poderemos ouvir o eco um pouco depois. Se conseguirmos medir o tempo que decorre entre a emissão do som e o eco, podemos determinar a distância a que nos encontramos do objecto que produz o eco. Por cada segundo de atraso do eco o som viaja cerca de 340 m. Como o som tem que viajar até ao obstáculo e ser reflectido à origem, a distância é de 170 m por cada segundo de atraso.

O sensor de movimento emite impulsos de ultra-sons a intervalos regulares (5, 10, 20 ou 50 por segundo, no caso dos sensores PASCO). Ultra-sons são ondas sonoras com frequência que ultrapassa a frequência máxima que podemos ouvir. O sensor dispõe também de um detector de ultra-sons e detecta o eco reflectido no objecto cuja posição se quer medir. O tempo entre cada impulso e

o respectivo eco, Δt , é convertido na distância ao objecto, L , usando a relação:

$$L = \frac{c_s \Delta t}{2}.$$

A constante c_s designa a velocidade do som ($c_s \approx 340 \text{ m s}^{-1}$). O instante correspondente a esta distância é o instante em que o eco foi reflectido. Logo, é o tempo médio entre a emissão e a reflexão,

$$\frac{t_1 + t_2}{2} = t_1 + \frac{\Delta t}{2},$$

em que t_1 é o instante de emissão do impulso e $t_2 = t_1 + \Delta t$ o de detecção do seu eco.

Como vemos, estes sensores medem apenas posições (várias vezes por segundo conforme o número de impulsos emitidos por segundo). Os resultados de velocidade e aceleração são obtidos por cálculos (processamento) sobre os dados de posição. Os detectores usados pela Polícia para medir a velocidade dos automobilistas baseiam-se noutro princípio (efeito de Doppler) e medem a velocidade directamente.

1. Se o sensor falhar a detecção de um eco de um impulso, pode interpretar o eco do impulso seguinte como sendo o eco do primeiro. Que acontece nesse caso ao valor de posição medida?
2. Para uma distância de 1 m, qual é o intervalo de tempo entre um impulso e o seu eco?

Procedimento

Esta experiência inclui um tratamento manual de dados adquiridos com um sensor de movimento. Antes de configurar a experiência convém ter alguma familiaridade com a aplicação de aquisição, *DataStudio*. O documento *Introdução ao Data Studio e Logger Pro* [2] tem uma introdução a este programa.

Sugerem-se os seguintes passos.

- a) Iniciar uma actividade no *DataStudio* com um sensor de movimento. Configurar a actividade para incluir apenas a tabela de posição em função do tempo.
- b) Usar uma taxa de aquisição baixa (5 medidas por segundo). Cada medição não deve durar mais de um a dois segundos. De outro modo o número de pontos adquiridos é demasiado elevado para tratamento manual em tempo útil.
- c) Realizar, pelo menos, as seguintes aquisições:
 - i) Movimento nos dois sentidos com a calha horizontal; movimento iniciado com um pequeno empurrão ao carro.
 - ii) Movimento com a calha ligeiramente inclinada, (elevada 3 a 4 cm num dos extremos), partindo do repouso na extremidade elevada;
 - iii) Movimento com a calha ligeiramente inclinada, partindo da extremidade mais baixa e iniciando o movimento com um pequeno empurrão de modo a fazer o carro subir a calha.

Nos casos em que o carro é empurrado convém usar o mecanismo de início automático de recolha de dados, de modo a eliminar a parte de lançamento inicial do carro com a mão. Em cada um destes movimentos o número de pontos adquiridos deve estar entre 5 e 10, por razões práticas.

Análise gráfica. Cálculo de velocidades

Construir os gráficos de posição em função do tempo, em papel milimétrico, tendo em atenção as recomendações do Anexo B. As seguintes questões e actividades referem-se aos vários movimentos registados. O trabalho sobre cada um dos movimentos pode ser feito por um grupo diferente de alunos. A discussão sobre cada movimento deve envolver todos os alunos.

3. Quais são os movimentos em que os valores das coordenadas registadas mais se aproximam de uma linha recta?

4. Para que coordenadas sucessivas da trajectória, x_1, x_2, \dots , definam uma recta, no gráfico de x em função de t , que condição devem satisfazer os deslocamentos $x_2 - x_1, x_3 - x_2$? Nota: os intervalos de tempo entre medições não variam.
5. Se o gráfico de x em função de t for uma recta, a sua equação terá a forma

$$x(t) = mt + b$$

em que m é o declive e b a ordenada na origem.

Qual é a velocidade média deste movimento *em qualquer intervalo*? Qual é a velocidade instantânea, *para qualquer t* ? Qual é a coordenada x no instante inicial, $t = 0$?

6. No caso de movimentos com a calha inclinada, o gráfico de x em função de t não é uma recta.
 - (a) Escolher um intervalo (por exemplo, entre a primeira e a última medições) e marcar no gráfico um movimento hipotético, que tivesse velocidade constante e igual à velocidade média do movimento nesse intervalo.
 - (b) Podemos usar diferentes intervalos para calcular a velocidade média. Tomando um ponto inicial fixo, (t_0, x_0) , calcular a velocidade média para intervalos de tempo de diferentes durações. Representar, noutra gráfico, a velocidade média em função da duração do intervalo. Podemos estimar a velocidade instantânea em t_0 ?
 - (c) Sobrepor ao gráfico de $x(t)$, um movimento cuja velocidade, após o instante t_0 , fosse igual à velocidade instantânea no instante t_0 , calculada na alínea anterior.

Tabela de velocidades

Embora o sensor de movimento só meça posições, x_1, x_2, \dots em determinados instantes, t_1, t_2, \dots , o programa de aquisição calcula uma tabela de velocidades

em função do tempo. Como?

7. Para os diferentes movimentos, construir a tabela de velocidades médias para os intervalos entre instantes sucessivos de medição

$$\begin{aligned}v_1 &= \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \\v_2 &= \frac{x_3 - x_2}{t_3 - t_1} \\&\vdots\end{aligned}$$

8. Comparar com a tabela fornecida pelo *DataStudio*. Como é que o *DataStudio* calcula os valores de tempo associados a estes valores de velocidade?
9. Representar graficamente a velocidade em função do tempo a partir da tabela construída na alínea anterior, calculando os tempos correspondentes do mesmo modo que o *DataStudio*.
10. Se o gráfico de velocidade em função do tempo for linear (uma recta), como varia no tempo a aceleração do movimento? Como se pode calcular do gráfico a aceleração?
11. Se o gráfico de v em função de t for uma recta, a sua equação terá a forma

$$v(t) = mt + b$$

em que m é o declive e b a ordenada na origem. Qual é a aceleração deste movimento? Qual é a velocidade v no instante inicial, $t = 0$?

12. Nesta experiência estudaram-se movimentos de descida e de subida (seguida de descida) numa calha com inclinação fixa. Como se comparam as acelerações nestes dois casos?

Actividade A19	Análise de movimentos de queda livre		
<i>Descrição</i>	É feita uma análise de um movimento de queda livre na vertical registado em vídeo.	<i>Versão</i>	1.0
<i>Autores</i>	Projecto Faraday	<i>Data</i>	15/11/2004

Objectivo

Nesta actividade estuda-se um movimento registado em vídeo, uma queda livre sem velocidade inicial, com um programa de análise de vídeo, *Aviméca*, que permite extrair as coordenadas de posição num clip de vídeo[1]. O objectivo é explorar conceitos de descrição de movimentos, nomeadamente o de aceleração, em actividades concretas de análise dos dados experimentais. Esta experiência mostra, também, que a queda livre é um movimento de aceleração constante.

Material

- Computador;
- aplicação de análise de movimentos em vídeo, *Aviméca*;
- clip de vídeo de queda livre sem velocidade inicial: um dos clips da pasta quedaesfera_03_01_2005¹;
- transparência para escrita à mão e marcadores apropriados;
- papel milimétrico.

¹Os vários ficheiros utilizam aplicações de compressão/descompressão (*codecs*) diferentes. Alguns podem não estar disponíveis no computador em uso. A actividade pode ser realizada com qualquer dos ficheiros desta pasta que o *Aviméca* consiga abrir.

O programa *Aviméca*, de autoria de Alain Le Gall, está disponível, para utilização livre, em http://www.ac-rennes.fr/pedagogie/scphys/outinfo/log/Avimeca/am_h.htm. O projecto Faraday disponibiliza uma versão em português no seu portal, <http://www.fc.up.pt/faraday>.

Procedimento

O seguinte procedimento pode ser realizado, em sucessão pelos diferentes grupos de alunos. Para uma explicação sobre o programa *Aviméca* ver a referência [1].

- a) Iniciar o *Aviméca*. Abrir um dos clips da pasta `quedaesfera_03_01_2005`.
- b) Estabelecer a escala de distâncias, usando as marcas do primeiro fotograma.
- c) Registrar as posições da esfera em cada fotograma do vídeo. Ter o cuidado de usar apenas posições em que a esfera já está em queda livre.
- d) Imprimir os resultados para análise posterior. O *Aviméca* permite também imprimir um gráfico contendo as posições do corpo em cada fotograma.

Actividades

Seguem-se algumas sugestões de análise deste movimento.

1. Numa folha de papel milimétrico, representar os pontos sucessivos da trajectória registados pelo *Aviméca* $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots$. Em alternativa usar a facilidade do *Aviméca* de imprimir esse gráfico.
2. Colocar uma transparência, com uma grelha rectangular, sobre a folha com o gráfico das posições sucessivas do corpo.
 - (a) Marcar na transparência um segmento unindo dois pontos sucessivos da trajectória do corpo (deslocamento);

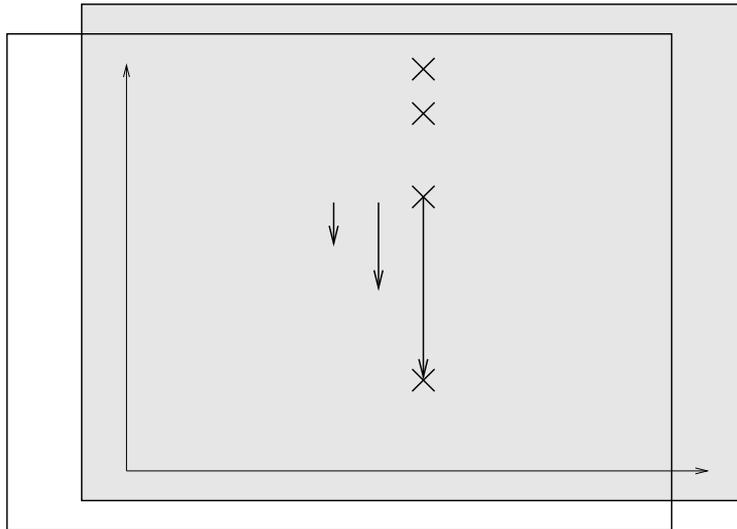


Figura 2: Comparar deslocamentos usando uma transparência.

- (b) deslocar a transparência, sem a rodar, mantendo os eixos paralelos às linhas da grelha, e marcar o deslocamento do intervalo seguinte ao lado do do primeiro, conforme se mostra na figura 2.
 - (c) Como variam os deslocamentos com o tempo? A velocidade média nos intervalos entre fotografias aumenta, diminui ou mantém-se constante?
3. Construir o gráfico de y (coordenada vertical) em função de t .
 4. No gráfico de y em função do tempo, usar o método já discutido na Actividade A18 para estudar a variação da velocidade média com a duração do intervalo de tempo; estimar a velocidade instantânea para um dos fotografias.
 5. Construir uma tabela de tempo, velocidade, usando o procedimento da Actividade A18, e representar graficamente a velocidade em função do tempo.
 - (a) Os dados podem mostrar alguma dispersão. A tendência média poderá corresponder a uma recta?

- (b) Traçar uma recta que descreva a tendência média de variação da velocidade com o tempo. Calcular o respectivo declive.
- (c) Com varia a aceleração neste movimento? Quanto vale?
- (d) Se a velocidade em função do tempo for representada por uma linha recta (aparte as incertezas experimentais), qual é a respectiva equação?

Actividade A20	Movimentos com velocidade variável		
<i>Descrição</i>	Como calcular deslocamentos em movimentos com velocidade variável.	<i>Versão</i>	1.0
<i>Autores</i>	Projecto Faraday	<i>Data</i>	25/11/2004

Objectivo

Aprender a relacionar áreas em gráficos velocidade-tempo com deslocamentos.

Recordar

Esta ficha de trabalho é muito semelhante à Ficha A6 do 10º ano. Na Ficha A6 discutiu-se a maneira de calcular trabalhos para forças variáveis. No caso presente, queremos ver como calcular deslocamentos quando a velocidade não é constante. É útil rever a ficha da Actividade A6.

Velocidade uniforme

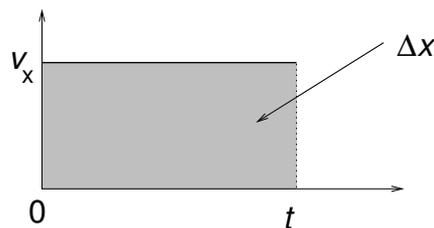


Figura 3: Se a velocidade for constante, o deslocamento $\Delta x = v_x t$: ou seja, é a área do gráfico de v_x vs t .

Se a velocidade for v_x constante, o deslocamento segundo a coordenada x entre 0 e t é

$$\Delta x = x(t) - x_0 = v_x t.$$

Num gráfico de v_x em função de t isso significa que o deslocamento é dado pela área entre o gráfico e o eixo dos Ot limitada pelos instantes 0 e t (Fig. 3).

Velocidade variável

E se a velocidade não for constante? Consideremos os vários casos (a) a (d) da Fig. 4.

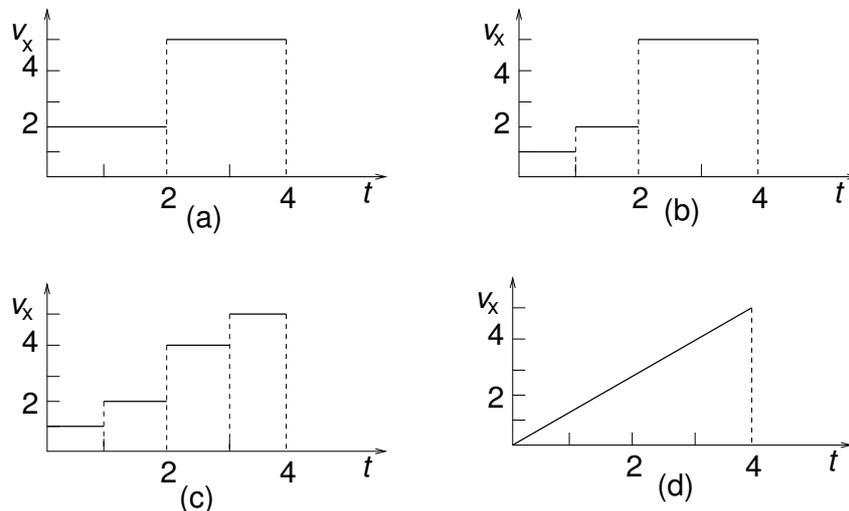


Figura 4: Como calcular o deslocamento nestas quatro situações?

- i) No caso de (a) qual será o deslocamento entre $t = 0$ e $t = 2$? E para o deslocamento entre $t = 2$ e $t = 4$? E o deslocamento total? Ainda é dado pela área entre o eixo dos tt e o gráfico de $v_x(t)$?
- ii) Podemos calcular o deslocamento nos casos (b) e (c), considerando os vários intervalos de tempo em que a velocidade tem um valor constante. O deslocamento total quanto vale? Ainda é igual à área do gráfico de $v_x(t)$?

- iii) No caso (d), que função $v_x(t)$ corresponde ao gráfico representado para $t < 4$?
- iv) Como se calcula o deslocamento no caso (d)?

Velocidades negativas

Quando a a velocidade é negativa o deslocamento, $\Delta x = v_x \Delta t$, é negativo também. Um gráfico de v_x em função de t , se v_x for constante, será como o da Fig. 5.

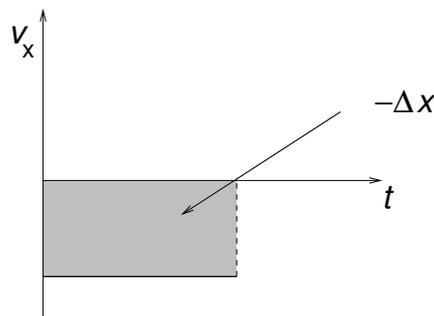


Figura 5: Se $v_x < 0$ o deslocamento é o simétrico da área entre o eixo do tt e o gráfico de v_x .

O deslocamento é agora o simétrico da área contida entre o gráfico de v e o eixo dos Ot . Áreas abaixo do eixo do Ot contam com um sinal negativo.

Consideremos agora o caso geral de uma velocidade cujo sentido varia durante o movimento (Fig. 6).

- (v) Qual é o valor do deslocamento total para a velocidade representada na Fig. 6?

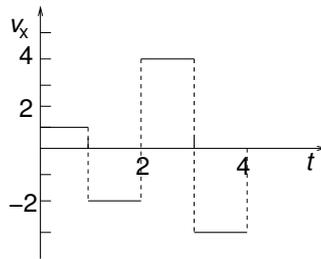


Figura 6: Quanto vale o deslocamento total entre $t = 0$ e $t = 4$?

Movimento uniformemente acelerado

O gráfico da figura 7 corresponde a um movimento com aceleração constante. Dada a equação da recta

$$v(t) = at + v_0,$$

mostrar que o deslocamento entre 0 e t é

$$x(t) - x(0) = \frac{1}{2}at^2 + v_0t. \quad (1)$$

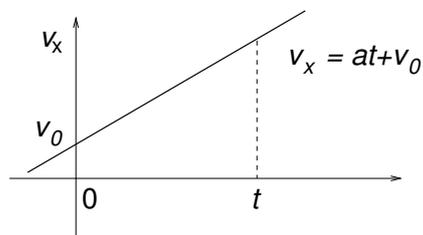


Figura 7: Qual é o deslocamento entre 0 e t ?

Actividade A21	Aceleração de um projectil		
<i>Descrição</i>	É feita uma análise gráfica de um movimento de projectil registado em vídeo.	<i>Versão</i>	1.0
<i>Autores</i>	Projecto Faraday	<i>Data</i>	22/11/2004

Objectivo

Nesta actividade analisa-se um movimento de um projectil registado em vídeo com o programa *Aviméca*, que permite extrair as coordenadas de posições num clip de vídeo[1]. O objectivo é verificar que a aceleração tem direcção vertical e analisar, separadamente, os movimentos segundo os eixos horizontal e vertical.

Material

- Computador;
- impressora (opcional);
- aplicação de análise de movimentos em vídeo, *Aviméca*;
- clip de vídeo de movimento de um projectil: um dos clips da pasta obliquo²;
- transparência para escrita à mão e marcadores apropriados;
- papel milimétrico.

O programa *Aviméca*, de autoria de Alain Le Gall, está disponível, para utilização livre, em <http://www.ac-rennes.fr/pedagogie/scphys/outinfo/log/>

²Os vários ficheiros utilizam aplicações de compressão/descompressão (codecs) diferentes. Alguns podem não estar disponíveis no computador em uso. A actividade pode ser realizada com qualquer dos ficheiros desta pasta que o *Aviméca* consiga abrir.

avimeca/am_h.htm. O projecto Faraday disponibiliza uma versão em português no seu portal, <http://www.fc.up.pt/faraday>.

Procedimento

O seguinte procedimento pode ser realizado, em sucessão, por diferentes grupos de alunos. Para uma explicação sobre o programa *Aviméca* ver a referência [1].

- a) Iniciar o *Aviméca*. Abrir um clip da pasta obliquo.
- b) Estabelecer a escala de distâncias usando as marcas do primeiro fotograma.
- c) Registrar as posições da esfera em cada fotograma do vídeo.
- d) Usar as facilidades do *Aviméca* para imprimir um gráfico com as posições da trajectória da esfera registadas em cada fotograma.

Actividades

Para a actividade seguinte é necessário usar uma transparência para escrita à mão. A transparência deve ter uma grelha rectangular marcada, para facilitar o seu deslocamento, sem rotação, sobre o papel onde está marcada a trajectória do projectil.

1. Usando a técnica da transparência já usada na Actividade A19, representar os deslocamentos de vários intervalos de tempo com uma origem comum. Esta actividade é mais fácil de concretizar considerando os deslocamentos, não entre fotogramas sucessivos ($\Delta t = 1/30 \text{ s}$), mas com dois fotogramas de intervalo (entre o primeiro e o quarto, quarto e sétimo *etc.*). Com o seguinte procedimento obtêm-se bons resultados.

- (a) Colocar a transparência sobre o papel onde está representada a trajectória. Marcar na transparência o vector deslocamento entre o primeiro e o quarto pontos da trajectória.
 - (b) Deslocar a transparência, sem a rodar, de modo a sobrepor a origem do vector com o quarto ponto da trajectória. Marcar o vector deslocamento entre o quarto e o sétimo pontos da trajectória.
 - (c) Repetir este procedimento para o sétimo e décimo pontos da trajectória e assim sucessivamente.
2. Observar a representação dos vectores deslocamento obtidos.
- (a) Sabendo que o clip de vídeo tem 30 fotogramas por segundo, qual é o intervalo de tempo correspondente a cada um dos deslocamentos representados?
 - (b) Representar no diagrama as diferenças entre os vectores deslocamento de intervalos sucessivos. Que direcção e sentido têm?
 - (c) Que direcção e sentido tem a diferença de vectores velocidade média entre intervalos sucessivos?
3. Imaginar um filme em que se representa um vector, com origem fixa, que em cada instante representa o vector velocidade do projectil. Como se move a extremidade desse vector?
4. Qual é a direcção e sentido da aceleração do projectil?
5. Representar os seguintes gráficos, usando os dados do *Aviméca*:
- (a) A coordenada x (horizontal) em função do tempo.
 - (b) A velocidade v_y segundo o eixo vertical (calculada como nas actividades anteriores, A18 e A19).
A que tipo de movimentos correspondem as coordenadas de posição segundo x e y como funções do tempo?
6. Calcular a aceleração deste movimento a partir do gráfico da alínea 5b.

7. Escrever um breve relatório que apresente os resultados e conclusões da análise feita a partir das questões anteriores.

Actividade A22	Força e movimento		
<i>Descrição</i>	Observação e discussão de um movimento em que uma força aplicada a um carro, numa calha, é subitamente removida.	<i>Versão</i>	1.0
<i>Autores</i>	Projecto Faraday	<i>Data</i>	15/01/2005

Objectivo

O objectivo desta actividade é a observação de uma situação em que uma força aplicada a um carro em calha linear é subitamente removida. A diferença das características do movimento, antes e depois remoção da força externa, é interpretada em termos das leis da Newton.

Material

- Calha de alumínio;
- carro de baixo atrito;
- sensor de movimento;
- computador e software de aquisição de dados;
- roldana;
- batente;
- fio e massas para suspender.

Na preparação desta actividade foi utilizado material PASCO:

- 1 PAScar e calha de alumínio (Ref. ME-9429A);
- 1 sensor de movimento PASport (Ref. PS-2103);

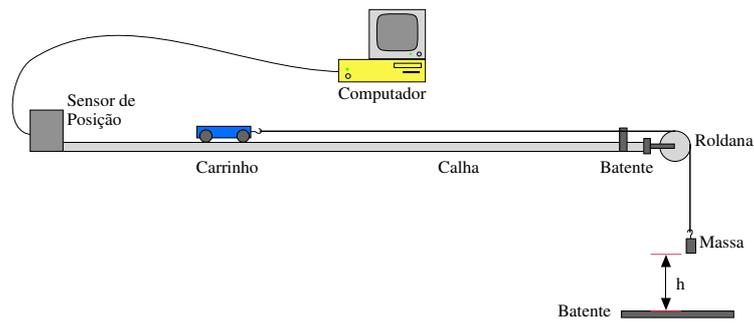


Figura 8: Esquema de montagem experimental.

- 1 USB-link (Ref. PS-2100);
- software *DataStudio* (Ref. CI-6870C).

Para uma introdução à aplicação *DataStudio* ver [2].

Procedimento

Um carro, pousado sobre a calha, é ligado por um fio a uma massa suspensa, conforme se pode ver no esquema da figura 8.

A massa cai uma altura h , regulável por posicionamento do batente. A posição do carro em função do tempo, é registada pelo sensor de posição. Após a massa atingir o batente, deixa-se mover livremente o carro .

Para assegurar uma boa reprodutibilidade de resultados, o sensor só deve começar a registar após o carro ter ultrapassado uma posição pré-determinada³ devendo ser lançado sempre da mesma posição. Para impedir que o carro caia ao chão, é conveniente colocar um batente no fim da calha.

Após a montagem e verificação do bom funcionamento do sistema, larga-se o carro e registam-se, em função do tempo, a posição e a velocidade do mesmo.

³A interface pode ser programada para um início de aquisição de dados retardado, determinado pela posição ou pela velocidade do carro. Também é possível programar o fim da aquisição do mesmo modo. Ver referência [2].

A experiência é repetida para diferentes valores de h , a distância entre a posição inicial da massa suspensa e do batente. É conveniente representar os valores de posição e velocidade dos diferentes ensaios no mesmo gráfico.

Questões

A discussão desta experiência é mais clara em termos dos gráficos de velocidade. A variação de velocidade em função do tempo mostra dois regimes de variação bem distintos. A tarefa para esta actividade é a de escrever uma breve discussão dos gráficos de velocidade em função do tempo. Esta discussão deverá abordar as seguintes questões e enquadrá-las nas leis de Newton:

1. Que tipo de movimento se observa no início, quando o carro está a ser puxado?
2. Quando é que se efectua a transição entre os dois tipos de variação?
3. Qual é o efeito do aumento da distância h ? Aumenta a aceleração do carro?
4. O carro pára quando deixa de ser puxado? Com que velocidade passa a deslocar-se, imediatamente após deixar de ser puxado?
5. A velocidade passa a ser constante após o carro deixar de ser puxado? Porquê?
6. Que aconteceria se fosse possível reduzir ainda mais o atrito das rodas do carro com a calha?
7. Como varia ao longo do tempo a força exercida sobre o carro, antes e depois de a massa encostar no batente?

Actividade A23	Segunda Lei de Newton		
<i>Descrição</i>	Estudo da segunda lei de Newton através da medição simultânea da força que actua sobre um corpo e da aceleração resultante.	<i>Versão</i>	1.0
<i>Autores</i>	Projecto Faraday	<i>Data</i>	15/01/2005

Objectivo

O estudo da segunda lei de Newton através da medição simultânea da força que actua sobre um corpo e da aceleração resultante.

Material

- Calha de alumínio;
- carros de baixo atrito;
- sensor de movimento;
- sensor de força;
- computador e software de aquisição de dados;
- roldana;
- fio e massas para suspender.

Na preparação desta actividade foram usados:

- material PASCO: 2 PAScar e calha de alumínio (Ref. ME-9429A);
- material Vernier: interface (Ref. LabPro), software LoggerPro 3, sensor de movimento (Ref. MD-BTD) e sensor de força (Ref. DFS-BTA).

Para uma introdução à aplicação LoggerPro ver a referência [2]

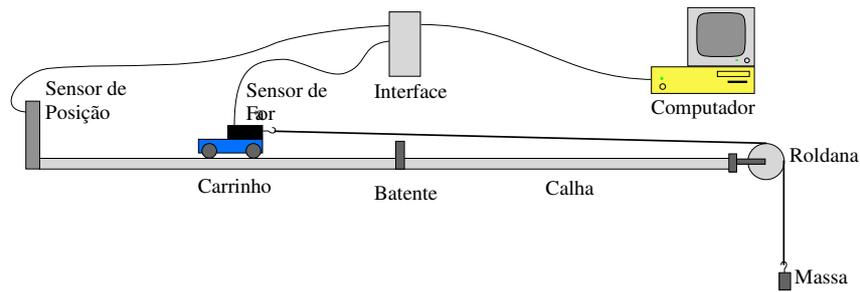


Figura 9: Esquema da montagem experimental

Procedimento

Um carrinho, pousado sobre a calha linear, é ligado por um fio a uma massa suspensa, conforme se pode ver no esquema da figura 9. É fixado sobre o carro um sensor de força. O fio que suspende a massa é preso ao sensor de força; deste modo, a força exercida pelo fio sobre o conjunto carro e sensor é medida directamente pelo sensor de força. Um sensor de posição permite registar o movimento do carro. É conveniente a colocação de um batente que impeça o carro de atingir o fim da calha. Um deslocamento do carro de uns 20 ~ 30 cm é suficiente para a finalidade desta experiência. Com esta montagem é possível registar, simultaneamente, a força exercida pelo fio sobre o carro (sensor de força) e a velocidade do carro (sensor de posição). Para instruções sobre a configuração da interface LabPro, ver a referência [2].

- Fazer a montagem experimental de acordo com o esquema da Fig. 9, e configurar a interface de modo a registar, em gráficos, os valores da força e da velocidade do carro.
- Verificar o funcionamento do sistema, largando o carrinho e vendo se o sistema regista os dados pretendidos.
- Começando com uma massa suspensa de cerca de 25 g, largar o carro e registar os valores de força e de velocidade durante um deslocamento do carro de 20 ~ 30 cm.

Verifica-se que os valores de força registados oscilam em torno de um valor constante. O programa de aquisição permite calcular o valor médio dos valores registados durante um intervalo à escolha. O gráfico de velocidade em função do tempo mostra uma variação linear: por ajuste de uma recta à zona de variação linear de $v(t)$, é possível obter o valor da aceleração no mesmo intervalo de tempo usado para calcular o valor médio da força.

- Usando as ferramentas de análise de dados do programa de aquisição, calcular o valor médio da força aplicada e o valor da aceleração do carro, num intervalo de tempo em que a aceleração do carro seja constante.
- Repetir para valores crescentes da massa suspensa (até 200 g).
- Representar a aceleração do carro em função da força.

Questões

1. Quando o carro está em repouso, que forças estão aplicadas sobre ele? A força medida pela sensor é igual ao peso da massa suspensa?
2. No gráfico de velocidade em função de tempo é possível encontrar um intervalo em que v em função de t é representado por uma linha recta. Que tipo de movimento é esse? Como se calcula a respectiva aceleração?
3. A segunda lei de Newton afirma que

$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

Segunda esta lei, como deve ser um gráfico do valor da aceleração do carro em função da força aplicada? Os resultados experimentais são consistentes com esta lei?

4. Esta experiência permite uma medição da massa do carrinho (com o sensor de força incluído). Qual é o valor obtido? Como se compara com o valor medido numa balança?

5. Quando o carro está em movimento, a força medida pelo sensor é igual ao peso da massa suspensa?

Suponhamos que o valor da massa suspensa é igual à do sistema carro-sensor; se a força medida pelo sensor fosse igual ao peso da massa suspensa, qual seria a aceleração do sistema? Qual seria a força do fio na massa suspensa?

6. Suponhamos que era possível realizar esta actividade, exactamente com o mesmo material, num laboratório na Lua, onde a aceleração da gravidade é aproximadamente $1/6$ da da Terra. Dos valores medidos nesta experiência quais são os que mudariam e como?

- (a) A aceleração, a , do carro;
- (b) a intensidade da força, F , medida pelo sensor;
- (c) o declive do gráfico de F em função da aceleração, a ;
- (d) a indicação da balança quando se pesa o carro (supondo que é uma balança de mola).

Actividade A24	Movimentos planetários vistos da Terra		
<i>Descrição</i>	Representação gráfica da órbita de um planeta medida no referencial da Terra.	<i>Versão</i>	1.0
<i>Autores</i>	Projecto Faraday	<i>Data</i>	15/03/2005

Objectivo

Usando a técnica de deslocação de uma transparência, representar graficamente uma órbita planetária tal como ela é vista por uma observador na Terra.

Material

- Transparência e canetas próprias.

Descrição

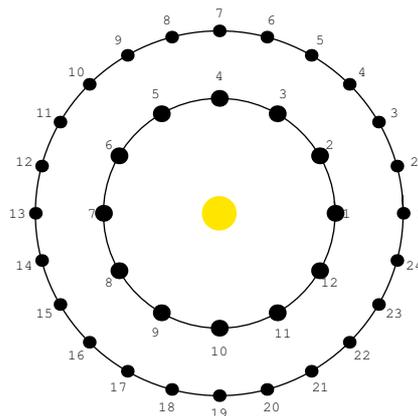


Figura 10: Posições sucessivas de dois planetas ao longo de 24 meses.

A figura 10 mostra as posições sucessivas de dois planetas na suas órbitas em torno do Sol, ao longo de 24 meses. Podemos supor que o planeta interior é a Terra, que completa a sua órbita em 12 meses, repetindo as mesmas posições (marcadas de 1 a 12) no segundo ano. A pergunta que queremos responder é a seguinte:

Qual é a órbita do planeta exterior num referencial com origem na Terra e com eixos definidos por estrelas distantes?

Para responder a esta questão podemos usar o seguinte conceito.

Coloquemos uma transparência sobre uma fotocópia da figura 11. A fotocópia representa o referencial em que o Sol está em repouso; a transparência pode ser deslocada de modo a acompanhar o movimento da Terra, ou seja, de modo a que a Terra ocupe sempre a mesma posição na transparência: por exemplo, a origem de um sistema de eixos. Nessa situação, as posições marcadas na transparência são relativas à Terra.

- Usando este conceito, marcar na transparência a órbita do planeta exterior relativamente à Terra, ao longo de dois anos. Note-se que o sistema de eixos da transparência, definido pela Terra e por posições de estrelas distantes fixas no céu, deve deslocar-se paralelamente a si próprio.

Questões

1. A órbita do segundo planeta em relação à Terra é circular?
2. Quais são as distâncias mínimas e máximas entre os dois planetas?
3. A órbita do segundo planeta é fechada? Que período tem?
4. Se o planeta exterior tiver um período de rotação em torno do Sol de 2 anos e meio (terrestres), isto é,

$$T_2 = \frac{5}{2}T_{\text{Terra}},$$

qual será período da sua órbita relativamente à Terra? Quanto tempo passa até que os dois planetas repitam as mesmas posições?

5. A órbita será sempre fechada, quaisquer que sejam os períodos de rotação dos dois planetas em torno do Sol?

Podemos fazer o mesmo exercício trocando os dois planetas e medindo a órbita do planeta interior no referencial do exterior. Antes de fazer esta tarefa responder às seguintes perguntas. Verificar as respostas desenhando a órbita referida.

1. Qual será o período da órbita do planeta interior, relativamente ao exterior?
2. A órbita será muito diferente da medida anteriormente? Porquê?

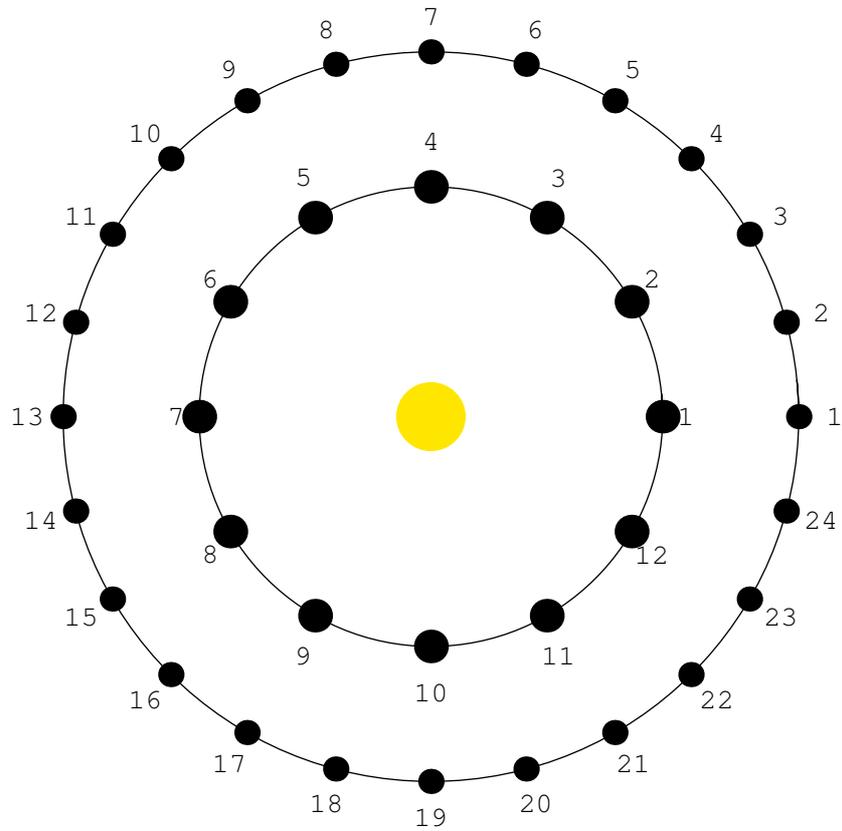


Figura 11: Usar esta figura para desenhar as órbitas relativas dos dois planetas numa transparência.

Actividade A25	Aceleração no movimento circular		
<i>Descrição</i>	Analisa-se graficamente um movimento circular uniforme segundo os eixos tangente e normal à trajectória.	<i>Versão</i>	1.0
<i>Autores</i>	Projecto Faraday	<i>Data</i>	30/03/2005

Objectivo

Com uma construção geométrica simples, decompõe-se um movimento circular uniforme segundo eixos tangente e normal à trajectória, numa pequena secção da trajectória. O estudo dos movimentos segundo essas direcções permite calcular a aceleração centrípeta.

Material

- Papel milimétrico;
- compasso.

Descrição

Sobre um papel milimétrico desenhamos um arco de circunferência correspondente a uma secção de uma trajectória de movimento circular uniforme. Com um compasso, podemos marcar sobre a trajectória posições sucessivas, correspondentes a intervalos de tempo iguais. Pretende-se nesta actividade analisar este movimento, usando um eixo Ox tangente à trajectória num dado ponto e um eixo Oy perpendicular à trajectória no mesmo ponto. As coordenadas x e y de cada posição sucessiva na trajectória podem ser lidas directamente no papel milimétrico.

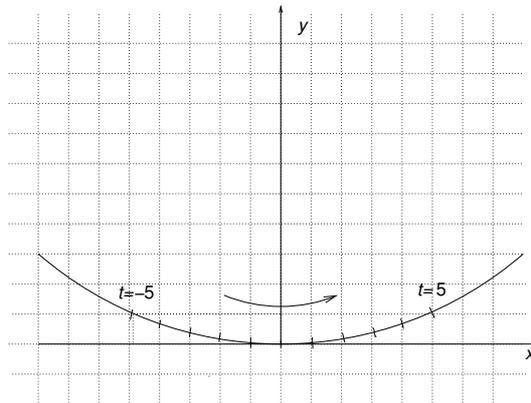


Figura 12: As marcas sobre o arco de circunferência representam posições sucessivas de um movimento circular uniforme. O centro da circunferência está sobre o eixo Oy .

Uma análise dos gráficos de $x(t)$ e $y(t)$ revela que, para secções da trajectória correspondentes a ângulos pequenos, muito menores que 90° , o movimento segundo x é uniforme e o movimento segundo y tem uma aceleração dirigida para o centro da trajectória dada por

$$a_y = \frac{v_x^2}{R},$$

em que R é o raio da trajectória e v_x a velocidade segundo x .

Procedimento

- Desenhar sobre uma folha de papel milimétrico uma figura semelhante à da figura 12:
 - desenhar o arco de circunferência, de raio tão grande quanto possível ($15 \sim 16$ cm); o ângulo subtendido pelo arco não deve ultrapassar os 60° ;
 - marcar os eixos Oy (que passa pelo centro da trajectória) e Ox , perpendicular ao anterior, com origem num ponto da trajectória;

- Marcar posições sucessivas sobre a trajectória que correspondam a intervalos de tempo iguais (cerca de quatro posições para cada lado, além da da origem). Isso pode ser feito usando o compasso.
- Supondo intervalos de tempo de $t = 1 \text{ s}$ entre os pontos sucessivos registados na trajectória, construir uma tabela de três colunas, t , x , e y e fazer os gráficos de $x(t)$ e de $y(t)$.

Questões

1. Que tipo de movimento é o da coordenada $x(t)$? Calcular a respectiva velocidade, v_x .
2. O movimento segundo a coordenada y é uniforme? Qual é a velocidade v_y quando o corpo passa na origem do sistema de eixos?
3. Qual é a direcção e sentido da aceleração do corpo ao passar na origem do sistema de eixos?
4. Investigar se o gráfico de $y(t)$ é compatível com o de um movimento uniformemente acelerado,

$$y_a(t) = \frac{1}{2}a_y t^2$$

com

$$a_y = \frac{v_x^2}{R}.$$

Qual é a aceleração do movimento circular uniforme?

5. Os resultados anteriores foram obtidos usando um arco de circunferência de ângulo inferior a 30° , para cada lado da origem. Se continuássemos a marcar pontos sobre a trajectória, para ângulos cada vez maiores, o movimento segundo x continuaria a ser uniforme?

Actividade A26	Aceleração dos Planetas		
<i>Descrição</i>	Calculam-se as acelerações dos planetas do Sistema Solar.	<i>Versão</i>	1.0
<i>Autores</i>	Projecto Faraday	<i>Data</i>	31/03/2005

Objectivo

Com recurso a uma tabela de dados astronómicos, (massas, raios e perímetros de órbitas) calculam-se as acelerações dos planetas do Sistema Solar em direcção ao Sol.

Material

- Tabela de dados astronómicos.

Descrição

No capítulo 5 vimos que um movimento circular tem uma aceleração dirigida para o centro da trajectória com módulo

$$a_c = \frac{v^2}{R}, \quad (2)$$

em que v é o módulo da velocidade do planeta e R o raio da sua órbita. A velocidade de cada planeta pode ser calculada a partir do seu período, T , e do perímetro da órbita, $2\pi R$:

$$v = \frac{2\pi R}{T}. \quad (3)$$

O que se pretende neste problema é calcular a_c para os vários planetas do Sistema Solar, usando as equações 2 e 3.

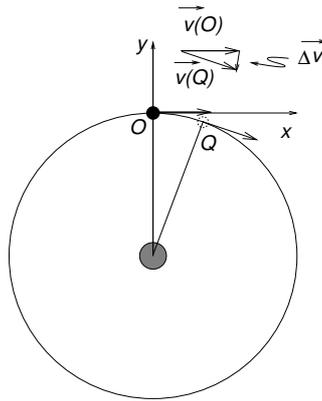


Figura 13: A velocidade do planeta rodou entre O e Q . v_y é nula em O e negativa em Q , logo há uma aceleração na direcção do centro da órbita.

Procedimento

Planeta	Massa/Massa da Terra	Período d	Distância ao Sol UA	v m s^{-1}	v^2/R m s^{-2}
Mercúrio					
Vénus					
Terra					
Marte					
Júpiter					
Saturno					
Urano					
Neptuno					
Plutão					

Tabela 1: A partir do período (em dias) e da distância ao Sol (em unidades astronómicas) calcular a distância percorrida por segundo por cada planeta (v) e a aceleração em direcção ao Sol (v^2/R).

1. Recorrendo a uma tabela de dados astronómicos completar as primeiras três colunas da tabela 1.

2. Calcular o módulo da velocidade de cada planeta em cada ponto da sua órbita (eq. 3) e preencher a quarta coluna da tabela.
3. Usando a equação 2, determinar a_c , a aceleração de cada planeta em direcção ao Sol.

Questões

1. Que factor parece ser mais importante na determinação de a_c ? A massa do planeta ou a sua distância ao Sol?
2. Verificar que o produto $a_c \times R^2$ é praticamente o mesmo para todos os planetas, isto é,

$$a_c = \frac{K}{R^2},$$

em que K é uma constante com o mesmo valor para todos os planetas do Sistema Solar. Calcular o valor de K .

Actividade A27	Movimento assistido por gravitação		
<i>Descrição</i>	Investiga-se o mecanismo de assistência gravitacional com um método gráfico.	<i>Versão</i>	1.0
<i>Autores</i>	Projecto Faraday	<i>Data</i>	31/03/2005

Objectivo

Com recurso a dados reais do encontro da *Voyager* com Júpiter e ao método da transparência para mudança de referencial, constrói-se a órbita da *Voyager* no referencial do Sol a partir da órbita no referencial de Júpiter.

Material

- Transparência para foto-copiadora;
- canetas de transparência.

Descrição

No final desta ficha de trabalho estão duas figuras com dados reais do encontro entre uma das *Voyager* e Júpiter, obtidas de um trabalho de um aluno da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto [3, 5].

Na figura 14 representam-se posições sucessivas de uma das sondas *Voyager*, separadas de 20 horas, durante o seu encontro com Júpiter. Júpiter ocupa a origem do referencial, sem se movimentar, o que significa que esta órbita está representada tal como seria vista por um observador em Júpiter (referencial de Júpiter). As unidades de distância usadas são apropriadas para estudo de órbitas à volta de Júpiter, unidades *jovianas* UJ:

$$1 \text{ unidade joviana} = 7,274 \times 10^7 \text{ m} = 7,274 \times 10^4 \text{ km.}$$

Nestas unidades o Sol encontra-se muito distante, no eixo Ox , com uma coordenada $x = -10700 \text{ UJ}$. A atracção gravítica do Sol é muito menor que a de Júpiter, no intervalo de tempo representado nas duas figuras, porque a distância da sonda ao Sol é muito maior que a distância a Júpiter.

A órbita da *Voyager* em relação a Júpiter é aberta. A sonda aumenta de velocidade ao aproximar-se do planeta, devido à sua atracção gravitacional e reduz a velocidade ao afastar-se, pois continua a ser atraída por Júpiter. Neste referencial o encontro com o planeta apenas altera a direcção da velocidade da sonda, não altera o respectivo módulo. Isso é uma consequência da conservação de energia no campo gravitacional de Júpiter.

Como é então possível usar estes encontros para aumentar a velocidade da sonda?

A resposta reside no facto de a velocidade aumentar **relativamente ao Sol**, não a Júpiter. A figura 15 mostra as sucessivas posições de Júpiter no referencial ligado ao Sol durante o encontro.

A questão que queremos responder é a seguinte:

Usando os dados das duas figuras, será possível reconstruir a órbita da Voyager tal como ela é vista no referencial do Sol?

Procedimento

Começemos por copiar (fotocopiar) a figura 15 para uma transparência. Pretendemos marcar na transparência as posições da *Voyager* no referencial do Sol. Neste referencial Júpiter move-se, ocupando as posições de 1 a 9 separadas por intervalos de tempo de 20 horas. No instante correspondente à posição 1 podemos fazer coincidir as origens dos dois referenciais.

1. Como podemos marcar na transparência a posição da *Voyager* no instante em que Júpiter está em **1**?⁴

Passadas 20 horas, Júpiter moveu-se para a posição 2 na transparência.

2. Como podemos marcar na transparência a posição da *Voyager* no instante em que Júpiter está em **2**? Note-se que a figura 14 dá-nos a posição **2** da *Voyager* **relativamente a Júpiter**⁵.

Sabendo a resposta a estas duas perguntas, não é difícil reconstruir, sobre a transparência, as posições da *Voyager* no referencial ligado ao Sol. Verificar o aumento de velocidade da sonda, neste encontro com Júpiter.

Questões

1. Calcular as acelerações da sonda devido às atracções de Júpiter e do Sol, quando a sonda ocupa a posição 1. Compará-las.
2. A partir dos dados da figura 15, estimar a velocidade orbital de Júpiter. Compará-la com o valor obtido a partir do período e raio da órbita de Júpiter.

⁴Resposta: basta fazer uma marca na transparência sobre a posição **1** da *Voyager* na figura 14.

⁵Resposta: deslocar a transparência de modo a fazer coincidir a posição **2** de Júpiter com a origem da figura 14. A posição da *Voyager* no referencial do Sol (transparência) coincide, nessa situação, com a posição **2** da *Voyager* na figura 14.

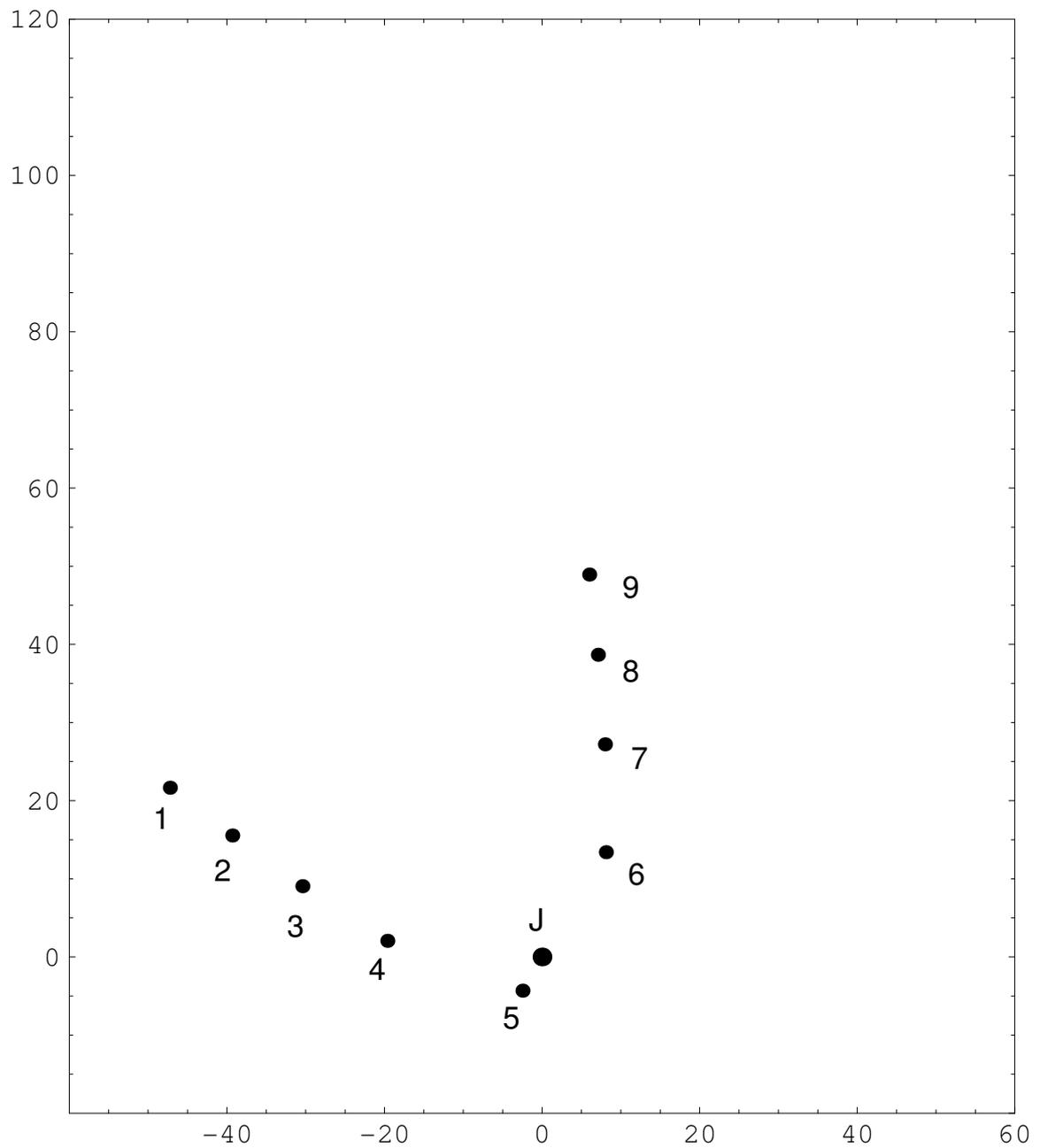


Figura 14: Posições da órbita da Voyager, de 20 em 20 horas, durante o encontro com Júpiter (J), no referencial de Júpiter.

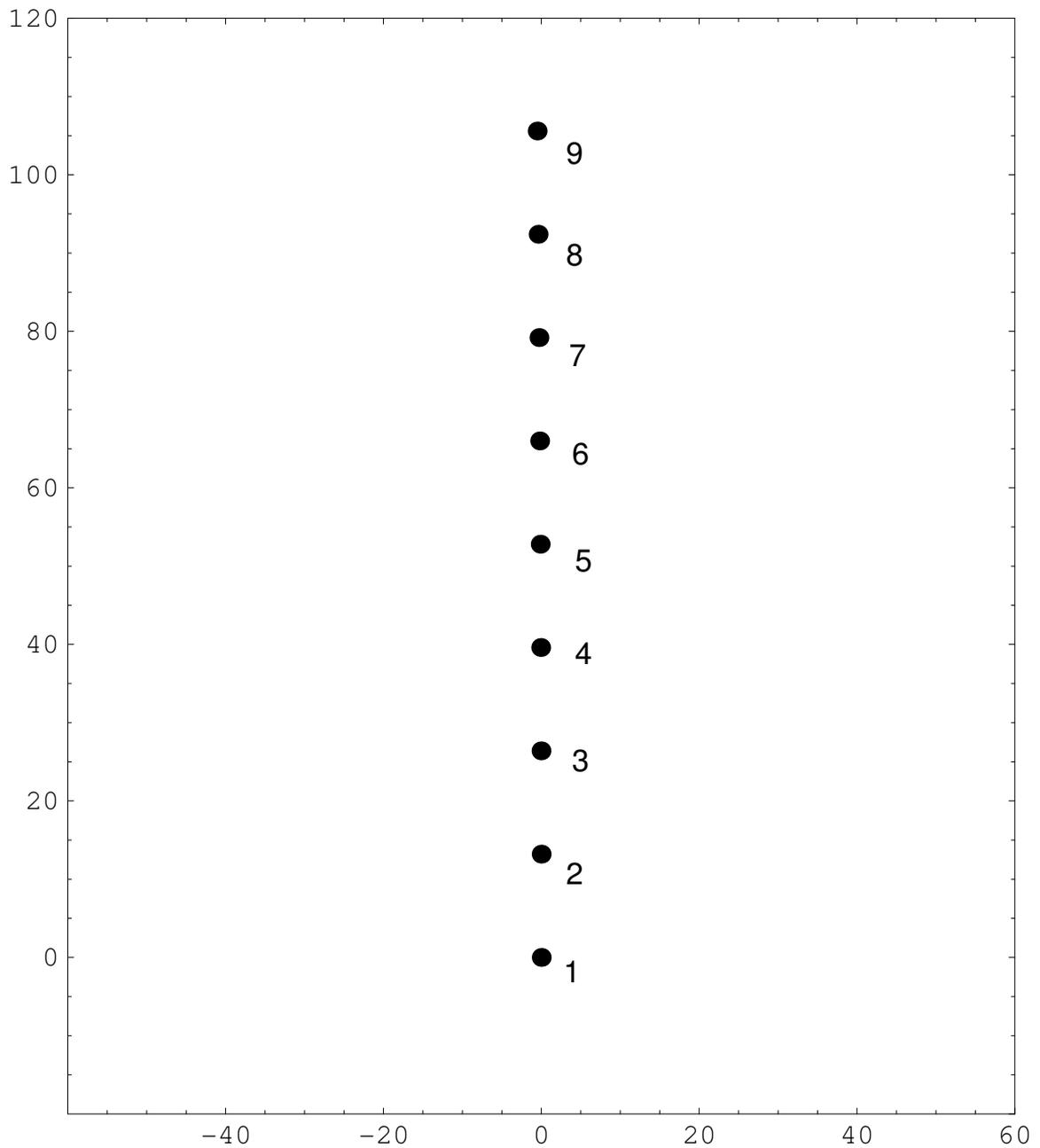


Figura 15: Posições da órbita de Júpiter de 20 em 20 horas, no referencial do Sol. O sol encontra-se na direcção de x negativo. Neste intervalo de apenas 180 horas, a curvatura da órbita de Júpiter é imperceptível.

Actividade A28	Força centrípeta e velocidade angular		
<i>Descrição</i>	Investiga-se experimentalmente a relação entre a força centrípeta e a frequência de rotação.	<i>Versão</i>	1.0
<i>Autores</i>	Projecto Faraday	<i>Data</i>	31/03/2005

Objectivo

Usando uma mesa giratória, accionada por um motor de velocidade angular regulável, investiga-se a relação entre a força centrípeta sobre uma massa e a frequência angular e raio da órbita da sua trajectória.

Material

- Mesa giratória, PASCO ME-8951;
- acessório de força centrípeta, PASCO ME-8952;
- motor de rotação, PASCO ME-8955;
- cronómetro automático, *Smart Timer* ME-8930;
- fonte de alimentação de 12 V, regulável.

Descrição

Imaginemos uma mola distendida até um comprimento l por uma força de módulo F . Suponhamos que a mesma mola tem uma extremidade fixa a um eixo de rotação e uma massa m na extremidade oposta. A mola é posta a girar, na horizontal. Quando o período de rotação é tal que o comprimento da mola é, de novo, l , a força centrípeta sobre a massa m é F . Na mesa giratória usada nesta experiência, a força \vec{F} é obtida suspendendo um peso conhecido na

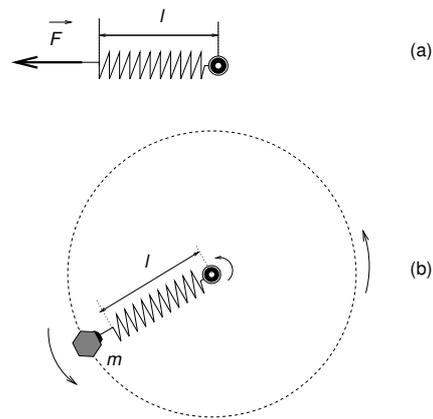


Figura 16: Se a mola em rotação tem comprimento l , a força centrípeta sobre a massa m é $\|\vec{F}\|$.

mola. A mesa tem um conjunto de dispositivos que permite colocar a mola em rotação de modo a ter o mesmo comprimento que tinha com o peso suspenso.

Modo de operar a mesa giratória

Esta secção deve ser lida na presença do dispositivo. De outro modo será difícil de compreender.

A mesa dispõe de uma massa com dois ganchos de fixação, suspensa por um fio no dispositivo lateral. É esta massa, m , que vai ser posta em rotação.

No gancho exterior de m pode ser suspenso um peso, P , usando a roldana da extremidade da mesa. Ao gancho interior é ligado um fio que, na outra extremidade, distende uma mola colocada verticalmente no dispositivo central. Com a mesa parada, e o peso P suspenso da roldana exterior, a posição do dispositivo lateral é ajustada de modo a que a massa m fique com o fio de suspensão vertical. A mesa dispõe de uma régua graduada que permite ler a sua distância ao eixo de rotação. Nesta situação, a mola é distendida por uma força de módulo P .

No dispositivo central, o eixo da mola passa por uma plataforma perfurada, que se pode deslocar na vertical. Essa plataforma é deslocada até coincidir com um

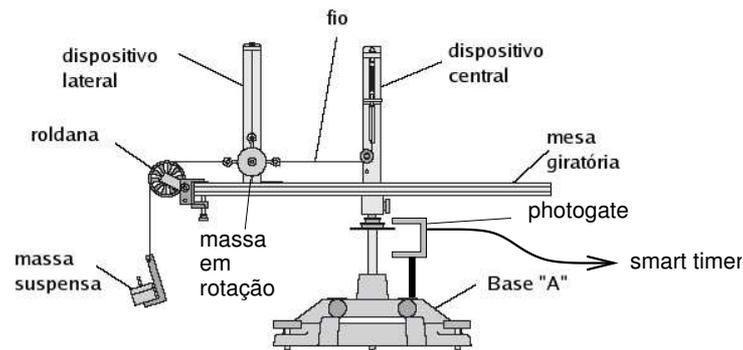


Figura 17: Mesa giratória PASCO. Nesta experiência a mesa é actuada por um motor regulável (não representado).

disco translúcido colocado na extremidade inferior da mola. Quando a mesa for colocada em rotação, a coincidência do disco translúcido com a plataforma de referência garante que a mola tem o comprimento correspondente a uma força de módulo P .

Retirando o peso suspenso no gancho exterior, a massa m desloca-se para o centro da mesa porque a mola do dispositivo central se contrai. O disco translúcido sobe e deixa de coincidir com a plataforma de referência.

Colocando a mesa em rotação, aumenta-se gradualmente a frequência de rotação, variando a tensão da fonte de alimentação do motor, até o disco translúcido descer e voltar a coincidir com a plataforma de referência. Nessa situação, a mola tem o mesmo comprimento que tinha quando a mesa estava parada, e a massa m tem um movimento circular uniforme, com um raio igual à distância do suporte lateral ao eixo de rotação. A força centrípeta é igual a P .

A frequência de rotação da mesa é medida com uma *photogate* ligada a uma cronómetro *smart timer* em modo **speed** \rightarrow **rev/s** (ver instruções do *smart timer*). Depois de accionado o botão **start**, a frequência de rotação medida na *photogate* é mostrada segundo a segundo.

Ficamos assim a conhecer os parâmetros:

- força centrípeta: o peso P que estava suspenso com a mesa parada;

- raio R da trajectória da massa m : é a distância do dispositivo lateral ao eixo de rotação;
- frequência de revolução, f : medida no *smart timer*.

Este procedimento é repetido para vários pesos diferentes. O ponto de suspensão da mola central pode ser variado, de modo a que a posição do suporte lateral se possa manter fixa. Deste modo podemos estudar a variação da força centrípeta, P , com a frequência de revolução, f , e com R fixo.

Nota: a mesa deve ter o eixo de rotação vertical e rodar no plano horizontal. É conveniente usar um nível, para garantir que está horizontal. Uma oscilação persistente do disco translúcido e dificuldade em estabilizar a sua posição quando a mesa roda, é sinal de desnivelamento da mesma.

Procedimento

1. Usando uma distância fixa do dispositivo lateral ao eixo de rotação, R , variar o peso suspenso (usar massas marcadas entre 40 ~ 120 g) e medir, para cada P , o valor da frequência de revolução correspondente.
2. Variar a distância do dispositivo lateral ao eixo de rotação (o ponto de fixação da mola no dispositivo central pode ser variado) e repetir o procedimento anterior para o novo raio R .
3. Representar graficamente P em função f^2 para diferentes valores de R . A variação é linear? Como varia o declive com R ?
4. Usando a expressão para a aceleração centrípeta referida no texto,

$$a_c = \frac{v^2}{R},$$

a segunda lei de Newton,

$$\vec{F} = m\vec{a},$$

e a relação entre a velocidade v e a frequência f ,

$$v = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi Rf,$$

obter uma relação entre o peso P e a frequência de revolução, f .

Qual é o declive dos gráficos de P em função de f^2 ?

5. Extrair do(s) gráfico(s) o valor da massa m e comparar com valor medido directamente com uma balança.

Actividade A29	Medição da Velocidade do Som		
<i>Descrição</i>	Determina-se a velocidade do som, medindo a diferença de tempos de passagem de um impulso em dois microfones.	<i>Versão</i>	1.0
<i>Autores</i>	Projecto Faraday	<i>Data</i>	15/05/2005

Objectivo

Medir a velocidade do som usando uma técnica de tempo de vôo. Dois microfones, ligados respectivamente aos canais direito e esquerdo de uma placa de som, registam um impulso sonoro. Uma aplicação de edição de som permite medir a diferença de tempos entre os sinais de cada microfone e obter a velocidade do som.

Material

- Computador PC com placa de som estéreo e entrada **Line-in** (identificada pelo símbolo «»);
- dois microfones de PC;
- caixa electrónica de alimentação dos microfones (fornecida pelo projecto);
- aplicação de edição de som CoolEdit®;
- fita métrica e suportes.

Descrição

O conceito base desta experiência está ilustrado na figura 18. Suponhamos que dispomos de dois microfones separados de uma distância conhecida, D .

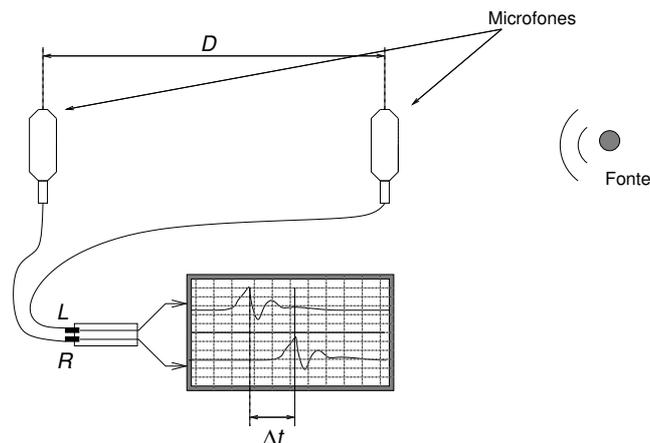


Figura 18: Método de tempo de voo para medição da velocidade do som.

Se usarmos um sistema de registo de som estereofónico com dois canais, esquerdo (L) e direito (R), podemos gravar separadamente o som registado em cada microfone. Se produzirmos um som brusco (bater de palmas ou de duas tábuas), o sinal registado pelo microfone mais distante da fonte terá um atraso relativamente ao mais próximo, devido ao tempo que o som demora a propagar-se a distância D . A velocidade do som será

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

Nesta montagem usamos um PC com placa de som estéreo como gravador. Uma caixa electrónica com alimentação, produzida nas oficinas do DFUP, permite ligar cada um dos microfones a um dos dois canais da placa de som através da entrada **Line-in** (símbolo $\llcorner \leftarrow \oplus \rightarrow \lrcorner$). A medição do tempo de atraso é feita usando a aplicação CoolEdit[®].

Procedimento

Velocidade do som no ar

A montagem sugerida está representada na figura 19. Com o programa CoolEdit[®] é possível registar os sinais dos dois microfones e medir a respectiva

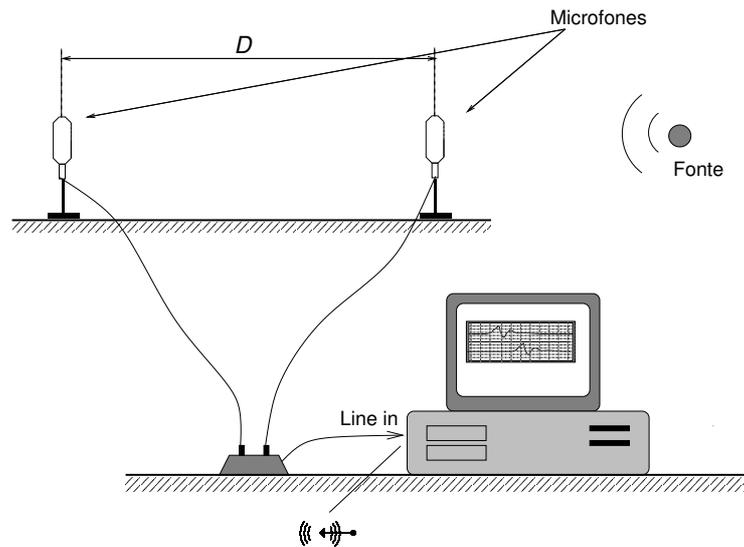


Figura 19: Montagem sugerida para medição da velocidade do som.

diferença de tempo. Para uma introdução ao CoolEdit[®] ver [4].

- Experimentar com fontes de som de diferentes tipos e escolher a que permita uma medição mais conveniente do tempo de atraso de um dos sinais relativamente ao outro.
- Planear um procedimento que permita medir o tempo de atraso em função da distância entre os microfones.
- Usar uma representação gráfica dos resultados que:
 - mostre a relação entre o tempo de atraso e a distância entre os microfones;
 - permita obter a velocidade de propagação do som.

Velocidade do som num sólido

Será possível medir a velocidade do som num sólido usando este dispositivo?

- Fixar os dois microfones sobre o tampo de uma mesa sólida. Criar uma onda de vibração no tampo com uma pancada, e verificar se é possível medir a velocidade de propagação das vibrações criadas pela pancada, de modo semelhante ao anterior.

Actividade A30	Sinais Periódicos		
<i>Descrição</i>	Explora-se a soma de sinais sinusoidais e introduz-se o conceito de espectro de frequências.	<i>Versão</i>	1.0
<i>Autores</i>	Projecto Faraday	<i>Data</i>	31/04/2005

Objectivo

Explorar as características de um sinal sinusoidal, amplitude, frequência e fase, por visualização interactiva numa folha de cálculo. Pelo mesmo processo gerar sinais periódicos por soma de sinais sinusoidais de frequências múltiplas de uma frequência fundamental. Visualizar a representação de espectral de sons gerados com as funções estudadas na folha de cálculo.

Material

- Computador PC com placa de som estéreo e colunas;
- um microfone de PC;
- aplicação de edição de som CoolEdit®;
- aplicação Microsoft Excel®;
- CD Sons (distribuído pelo projecto);

Procedimento

Esta actividade usa várias facilidades do programa de edição de som CoolEdit®. Algumas indicações sobre a sua utilização estão em [4]. É conveniente familiarizar-se com este programa antes desta actividade.

Tom puro

Um sinal sonoro sinusoidal (tom puro) é caracterizado por uma variação temporal de pressão dada por:

$$P(t) = P_0 \text{sen}(2\pi f_0 t + \theta_0).$$

1. Como varia o gráfico de $P(t)$ quando variam os parâmetros P_0 , amplitude, f_0 , frequência e θ_0 , fase inicial?

Para responder a esta pergunta abrir com o Microsoft Excel[®] o ficheiro `sinais_harmonicos.xls` do CD Sons, pasta `fich_excel`, e seguir as instruções relativas ao primeiro exercício.

2. Como se reflectem estas características, P_0 , f_0 e θ_0 na qualidade do som que ouvimos?

Na pasta `sinais_sintese`, existem dois ficheiros de som, `tones.wav` e `volume_tone.wav`. Abri-los com o CoolEdit[®] e reproduzi-los. Usando as facilidades de ampliação da escala temporal do CoolEdit[®] inspeccionar a dependência temporal dos sinais gravados.

3. Como se manifesta auditivamente a variação a amplitude do sinal e da sua frequência?
4. A fase inicial afecta a percepção auditiva do som? Se afectasse, a qualidade do som não deveria depender de quando começássemos a ouvi-lo?

Soma de sinais sinusoidais

No segundo exercício do ficheiro `sinais_harmonicos.xls`, visualizam-se somas de sinais sinusoidais com frequências múltiplas de uma frequência fundamental, f_0 , ($f_0, f_2 = 2f_0, f_3 = 3f_0, \dots$):

$$P(t) = P_0 \text{sen}(2\pi f_0 t + \theta_0) + P_2 \text{sen}(4\pi f_0 t + \theta_2) + \dots \quad (4)$$

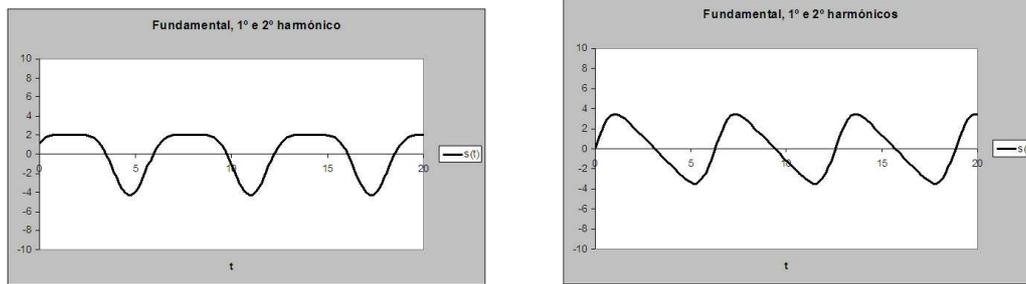


Figura 20: Dois sinais obtidos sobrepondo sinusóides de frequência f_0 , $2f_0$ e $3f_0$. Com que fases e amplitudes?

A folha de cálculo permite variar as amplitudes e fases dos sinais sobrepostos, e observar o gráfico de cada sinal e da respectiva soma. Alguns minutos de prática permitem construir sinais como os das Figuras 20 e 21.

5. Será que $P(t)$ ainda é periódico? Porquê? Qual é o respectivo período?
6. Na secção 3 da folha de cálculo `sinais_harmonicos.xls` procurar encontrar os parâmetros que reproduzem os sinais da Figura 20.
7. Na secção 4 da folha de cálculo `sinais_harmonicos.xls` procurar encontrar os parâmetros que reproduzem os sinais da Figura 21.

Espectro de um sinal

Na pasta `sinais_sintese` existem dois ficheiros de som, `triang_3harm.wav` e `serra_3harm.wav`, sintetizados de modo a que o gráfico de $P(t)$ seja idêntico ao sinal “dente de serra” da figura 20 e ao sinal “triangular” da figura 21. Abrir cada um destes ficheiros com o CoolEdit© e ouvi-los. Usando o menu `Analyze`→`Frequency Analysis`, abrir a janela que mostra a distribuição de potência do sinal pelas diferentes frequências que o compõem.

8. Em que frequências é que estes sinais têm potência espectral? (Deslocando o cursor do rato sobre o gráfico do espectro, o valor da frequência

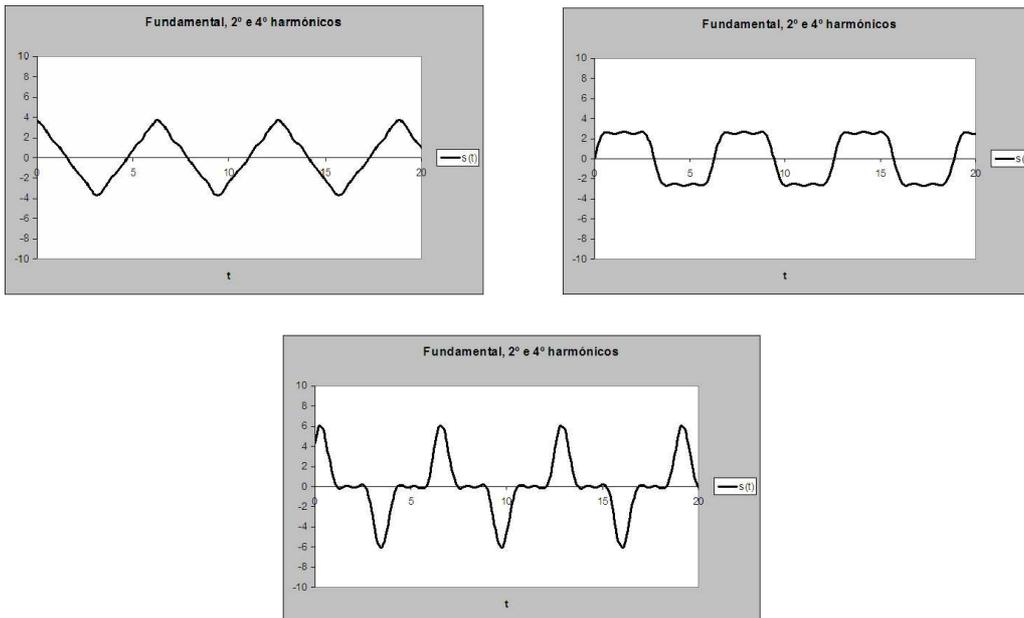


Figura 21: Três sinais obtidos sobrepondo sinusóides de frequência f_0 , $3f_0$ e $5f_0$. Com que fases e amplitudes?

onde está o cursor aparece escrito no canto inferior direito). Qual é frequência fundamental? Relacionar, qualitativamente, a potência em cada frequência com as amplitudes P_0 , P_2, \dots , das sinusóides que compõem cada sinal.

Na mesma pasta encontra-se um outro ficheiro de som `wforms.wav` com sinais de onda quadrada, triangular e dente de serra mais perfeitos que os que foram gerados no Microsoft Excel[®]. Cada uma destas formas de onda tem duração de um segundo sem intervalo entre elas. Abrir este ficheiro e visualizar o gráfico de $P(t)$ para cada um dos sinais. Abrir a janela do espectro de frequências de cada um dos sinais. Para ver os espectros de cada uma das formas de onda separadamente, seguir o seguinte procedimento:

- na janela temporal colocar o cursor no meio do intervalo de tempo ocupado por cada um dos sinais;

- Na janela de frequências escolher `FFT size` inferior a metade da duração de cada sinal.
9. Qual é frequência fundamental destes sinais? Quais são as frequências em que aparece a maior intensidade espectral? Como se comparam estes espectros com os dos sinais observados nos ficheiros `triang_3harm.wav` e `serra_3harm.wav` que só têm a frequência fundamental e dois harmónicos?

Usando a facilidade de gravação do CoolEdit[®], gravar um som não periódico, por exemplo, palmas, ou uma pancada numa mesa. Ver o respectivo espectro.

10. Qual é diferença fundamental deste espectro em relação ao de sinais periódicos? Também surgem os picos de intensidade bem definidos numa série harmónica, $f_0, 2f_0, \dots$? Ou a potência distribui-se continuamente numa gama de frequências?

Actividade A31	Análise de Voz		
<i>Descrição</i>	A análise espectral de voz põe em evidência diferenças entre as vozes de diferentes pessoas.	<i>Versão</i>	1.0
<i>Autores</i>	Projecto FARADAY	<i>Data</i>	20/04/2005

Objectivo

Comparar os sinais sonoros produzidos por pessoas diferentes ao pronunciar o mesmo fonema, identificando as respectivas semelhanças e diferenças.

Material

- Computador com placa de som;
- microfone de PC;
- aplicação de edição de som CoolEdit®;

Procedimento

Liga-se o microfone à entrada de microfone do computador. Esta entrada tem o símbolo , ou o símbolo de um microfone. Em alternativa, podem ser utilizados dois microfones ligados à caixa electrónica de ligação fornecida pelo projecto, por sua vez ligada à entrada **Line-in**, identificada pelo símbolo .

- Abrir o programa CoolEdit®. Sobre a utilização deste programa, ver [4]. Iniciar uma nova gravação.
- Gravar o som de uma vogal simples (*aaah*, *eeeh*, *iiih*, *oooh* ou *uuuh*).

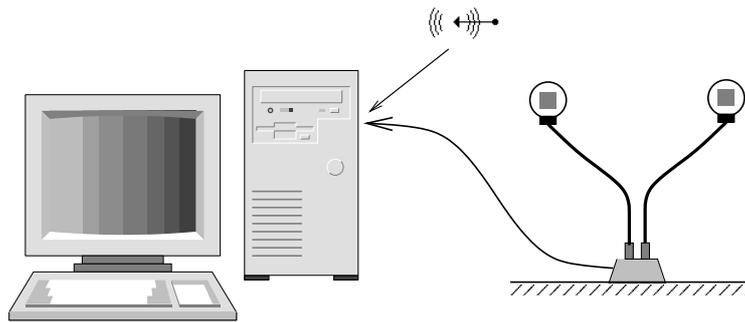


Figura 22: Montagem usada para estudo de sinais gerados pela voz humana.

- Ampliar a escala de tempo de forma a observar a forma do sinal.
- Para observar o espectro em frequência do sinal gravado, seleccionar o menu **Analyze**→**Frequency Analysis**; para uma melhor visualização, recomenda-se que não esteja seleccionado o botão **Linear View** (desta forma obtém-se uma escala logarítmica nas frequências permitindo uma melhor análise nas frequências baixas).

Em geral, aparece um sinal espúrio, a uma frequência baixa, correspondente ao sinal de fundo do conjunto microfone-placa de som. Para identificar esta frequência, recomenda-se fazer a análise espectral ao sinal no início da gravação, no tempo de silêncio antes de se produzir o som. (ver figura 23)

- Repetir a análise com outra pessoa e comparar os sinais. (No caso de se utilizarem dois microfones podem-se gravar e analisar dois sinais, simultaneamente.)
- Gravar uma frase simples e analisá-la no domínio temporal. Tentar identificar no sinal as alterações correspondentes às consoantes e a duração das vogais.
- Variar a altura a que é emitida vogal. Comparar os respectivos espectros.

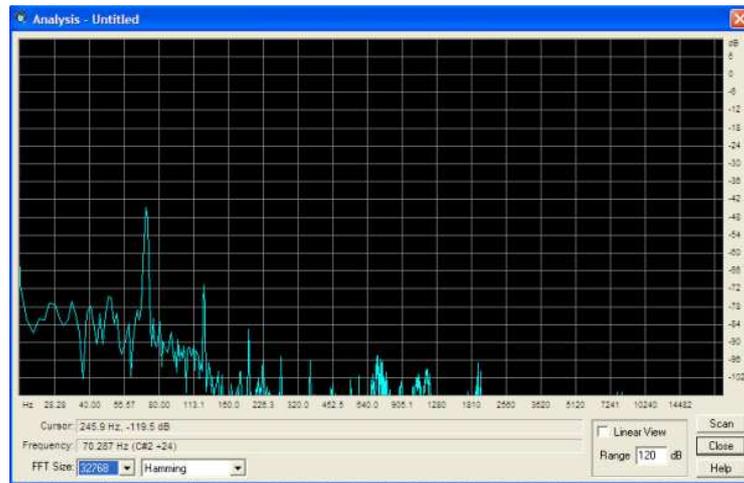


Figura 23: Espectro do sinal de fundo.

Questões

1. Existem diferenças significativas na forma do sinal em função do tempo para as mesmas vogais produzidas por pessoas diferentes?
2. Os sinais produzidos ao pronunciar vogais sustentadas são aproximadamente periódicos? O espectro de frequências apresenta picos de intensidade bem definidos a certas frequências (riscas)?
3. Existem diferenças significativas na frequência fundamental das mesmas vogais produzidas por pessoas diferentes?
4. O que é mais importante para a identificação de uma voz, a sua frequência fundamental ou o seu conteúdo harmónico?
5. É possível distinguir a forma temporal das consoantes?

Bibliografia

- [1] J.M.B. Lopes dos Santos. Avimeca: programa de análise de vídeo. Projecto Faraday, Departamento de Física, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, 2004.
- [2] J.M.B. Lopes dos Santos. Introdução ao DataStudio e Logger Pro: programas de aquisição de dados. Projecto Faraday, Departamento de Física, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, 2004.
- [3] Aires Francisco. Trabalho de Física Computacional, FCUP, 2003-2004. Projecto da disciplina de Física Computacional, 2002/2003, 2003.
- [4] J. M. B. Lopes dos Santos. Introdução ao CoolEdit: um programa de edição de som digital. Projecto Faraday: Departamento de Física, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, 2005.
- [5] Nuno Peres. O encontro do milénio. *Gazeta de Física*, 25(4):4, 2002.