

# LABORATÓRIO DIDÁCTICO ASSISTIDO POR COMPUTADOR

ANTÓNIO MOREIRA GONÇALVES

Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa  
Edifício C1, 4.º Piso - Campo Grande 1700 LISBOA

*O desenvolvimento da Física nas últimas décadas tem acompanhado de perto a evolução dos computadores, quer contribuindo para o desenvolvimento destes, quer tirando partido das imensas capacidades que os mesmos oferecem. Deste modo, os computadores contribuem activamente para o processo de ensino, nomeadamente, na sua vertente experimental. Neste trabalho, abordamos as potencialidades do laboratório didáctico assistido por computador, em especial na aquisição de dados e interpretação gráfica de resultados. São considerados dois tipos de variáveis (digitais e analógicas) e descrevem-se, a título de exemplo, aplicações em mecânica, termologia e electromagnetismo. As potencialidades no ensino são ilustradas com a dedução das leis experimentais do movimento pendular assim como das leis de Faraday e de Lenz do electromagnetismo.*

## 1. Introdução

O desenvolvimento da Física nas últimas décadas, independentemente da natureza teórica ou experimental dos estudos realizados, tem-se apoiado na utilização em larga escala de computadores. De facto, estes têm permitido aos teóricos interpretar os fenómenos físicos através de modelos matemáticos, anteriormente proibidos pelo enorme volume de cálculo numérico necessário, e possibilitado aos experimentalistas a concepção de experiências sofisticadas, envolvendo controlo de variáveis durante longos períodos de tempo. O controlo simultâneo dos diversos instrumentos de medida, a aquisição directa de dados e o tratamento imediato dos mesmos, com a consequente extracção de informação mais ampla e mais precisa, vieram pôr em relevo novos fenómenos, desafiando os teóricos para o desenvolvimento de novos modelos. Nesta dialéctica se faz a evolução do conhecimento puro e o desenvolvimento de novas tecnologias. Por exemplo, as novas descobertas em Física, relacionadas com a preparação e caracterização de

novos materiais, têm proporcionado o desenvolvimento de sucessivas gerações de computadores, cada vez menores, mais velozes e com maior capacidade gráfica e de cálculo. Abrem-se assim novas possibilidades para o desenvolvimento da Física Teórica e Experimental. O desenvolvimento paralelo da Física e das Ciências da Computação tem sido nas últimas duas décadas um traço característico na evolução do conhecimento científico e na produção da tecnologia. A conjugação dos conhecimentos destas duas ciências permitiu abrir novas áreas de desenvolvimento interdisciplinar e, muito particularmente, de técnicas instrumentais assistidas por computador (veja-se o caso das aplicações em Medicina).

Diversos autores, por exemplo GONÇALVES (1985), THORNTON (1988) e MACKENZIE (1988), têm feito notar que todo este desenvolvimento das ciências da computação e da tecnologia associada não pode deixar de ter reflexo no modo como se ensina a Física. Mais recentemente, REDISH e WILSON (1989) assinalaram mesmo alterações na natureza do que se ensina em Física. Nos

**Instrumentos  
assistidos por  
computador**

**Detector de passagem  
de objectos**

**Radar ultra-sónico**

**F.e.m. e lei de Lenz**

**Medição de  
temperatura**

**Osciloscópio com  
memória**

nossos dias, já não é possível preparar físicos teóricos sem que estes saibam resolver problemas numéricos por recurso ao cálculo automático, ou físicos experimentais que desconheçam os princípios da instrumentação assistida por computador. Mas teremos igualmente de questionar os currícula em Física, e incluir novas questões (como sejam os problemas do caos estudados pela geometria fractal) assim como reequacionar a abordagem de velhos problemas, explorando as possibilidades que o computador oferece em todo o processo de ensino.

Neste trabalho abordamos a transformação dos instrumentos de medida utilizados no laboratório didáctico, que permitam o acesso à observação precisa de fenómenos que de outro modo seria impossível de alcançar. Não nos detemos nas particularidades dos processos de medida que a utilização de um computador implica, envolvendo conhecimentos particulares de electrónica ou de programação. Apenas estamos interessados nos fenómenos físicos utilizados na detecção de eventos, na natureza destes, assim como na interpretação física dos resultados obtidos. Os exemplos que ilustram a exposição são escolhidos de entre experiências que visam a observação de leis experimentais. Embora algumas sejam clássicas, a introdução do computador permite a revelação de particularidades importantes, com precisão, e sem necessidade de longos e penosos esforços de preparação das experiências. Deste modo procura-se mostrar como o computador, auxiliando no processo de aquisição de dados e na representação dos resultados, pode ser utilizado, quer pelo professor, em aula magistral, quer directamente pelos alunos, em aulas de laboratório.

## 2. Instrumentos assistidos por computador

Começamos por caracterizar as situações em que o recurso a um computador, no processo de aquisição de dados, é particularmente útil, ou mesmo indispensável. Tal ocorre quando se torna necessário:

- a) registar acontecimentos em função do tempo, sendo esta grandeza crítica para a precisão final dos resultados;
- b) representar gráfica e imediatamente os dados adquiridos;
- c) interpretar um grande volume de dados;
- d) controlar a aquisição de dados em função de outras grandezas.

Esta caracterização, ainda que genérica, é válida para qualquer tipo de laboratório, e nomeadamente no ambiente do laboratório didáctico que pretendemos abordar.

## 3. Grandezas digitais e estudos de cinemática

### 3.1. O detector de passagem de objectos

A aplicação didáctica mais simples do computador em laboratório consiste no registo dos instantes em que ocorre a passagem de um objecto em determinados pontos da trajectória (MELO *et al.* (1987)). Esta passagem pode ser assinalada pela interrupção de um feixe de luz. Um detector apropriado, sensível à radiação (fotodetector), produzirá um sinal eléctrico por cada passagem de um objecto na sua frente (evento). Este sinal eléctrico, uma vez devidamente tratado por processos electrónicos, caracterizar-se-á pelas duas transições de nível que correspondem à passagem da situação de iluminado para não iluminado, e inversamente (ver fig. 1). O computador é aqui utilizado para detectar e registar os tempos em que ocorrem estas transições.

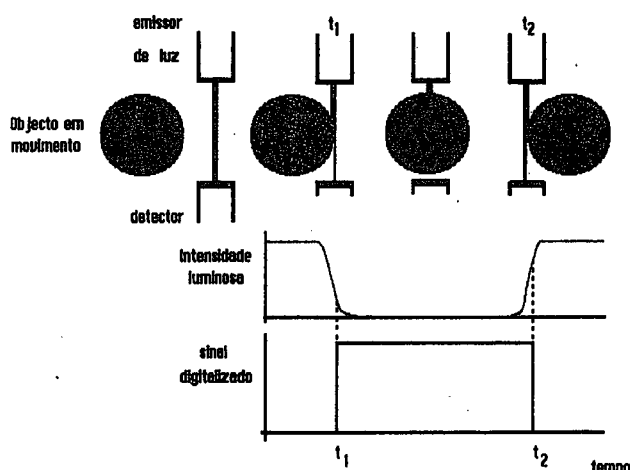


Fig. 1 — Esquema de funcionamento do detector de passagem de objectos. Representa-se o sinal tal como é obtido através do sensor de luz, e após tratamento pelo circuito condicionador apropriado (digitalizador).

Colocando detectores em posições pré-determinadas, e registando os instantes em que ocorre a interrupção da iluminação do detector, ficamos a conhecer o tempo que o objecto leva a percorrer os espaços entre esses detectores. Por outro lado, o conhecimento da dimensão do objecto e do tempo durante o qual se verificou a interrupção do feixe luminoso permite avaliar a velocidade de deslocamento no ponto da trajectória em que aquele cruzou o feixe luminoso. Se o objecto tiver uma forma que interrompa o feixe de luz duas vezes em cada passagem, a aceleração instantânea poderá igualmente ser avaliada.

Em condições normais de observação experimental, os intervalos de tempo envolvidos poderão ser da ordem

de, ou mesmo inferiores, ao milissegundo. Qualquer erro de estimativa nos instantes em que ocorrem os eventos, assim como quanto à duração dos mesmos, produzirá erros finais tão grandes que impedirão a interpretação dos resultados. Nestas circunstâncias torna-se conveniente a introdução de um computador dotado de uma interface de comunicação com o meio exterior que permita detectar a ocorrência de sinais eléctricos gerados pelos fotodetectores, e que assinalam a presença ou ausência de feixe de luz. Esta interface diz-se digital, por apenas dar conta da transição de nível, ou seja, responder a informação que pode ser representada por um único dígito (0 ou 1). Um programa apropriado permite registar o instante e a natureza da transição de sinal ocorrida. Estes dados primários são depois facilmente traduzidos nos dados secundários: tempo decorrido, velocidade e aceleração. Introduzindo os espaços percorridos para cada instante (posição dos detectores) pode-se elaborar os gráficos de variação das diversas grandezas cinemáticas ao longo do tempo.

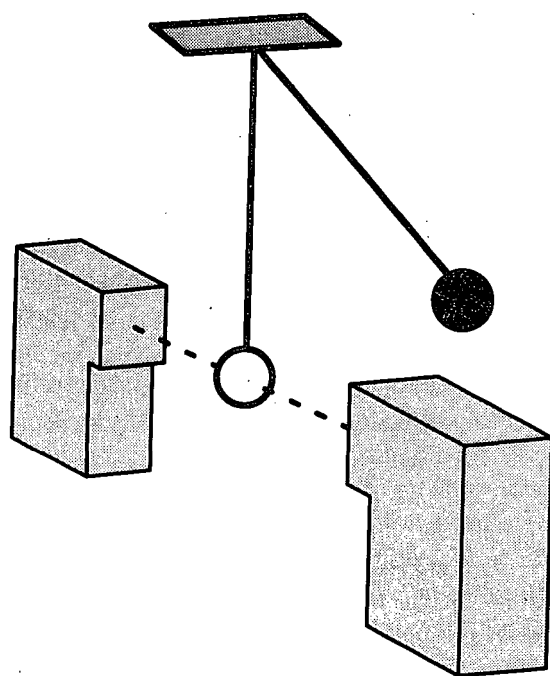


Fig. 2 — Esquema de montagem de um detector de passagem de objectos para estudo do período de oscilação de um pêndulo simples.

Como exemplo ilustrativo consideremos um pêndulo simples, em que a detecção é efectuada na posição de repouso, como se representa na fig. 2 (MELO *et al.* (1987)). O período de oscilação é determinado pelos tempos decorridos entre cada três passagens consecutivas pelo detector. Por outro lado, conhecida a dimensão da

parte do pêndulo que provoca a interrupção do feixe de luz, é possível avaliar a velocidade de passagem do pêndulo naquela posição. Na fig. 3 podemos analisar os gráficos da variação no tempo do período de oscilação e da velocidade de passagem, obtidos para uma situação em que o pêndulo oscila segundo um ângulo de abertura

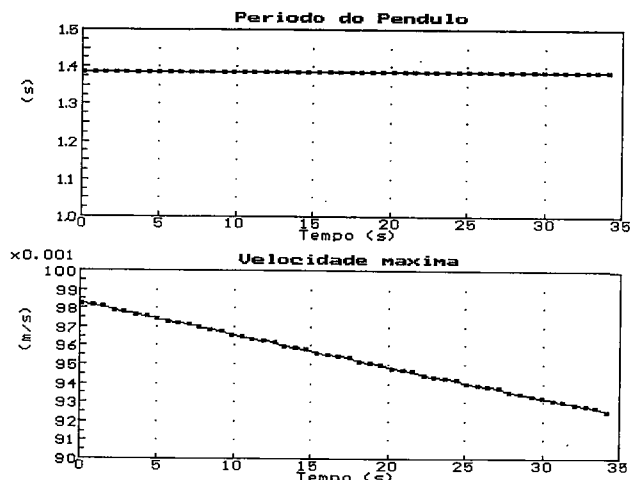


Fig. 3 — Gráficos referentes a um pêndulo simples da variação do período de oscilação e da velocidade máxima (medida na passagem pelo detector).

pequena. Facilmente se verifica que a velocidade de passagem vai decrescendo. Este último facto põe em evidência a progressiva diminuição da energia cinética máxima (ou da energia potencial máxima), o que mostra que o ângulo de oscilação vai diminuindo no tempo. Mas, em simultâneo, verifica-se que o período não varia ao longo do tempo, o que mostra que as pequenas oscilações são isócronas. Tais conclusões são praticamente impossíveis de observar utilizando o clássico cronómetro manual.

O método experimental descrito permite uma grande diversidade de experiências de mecânica, utilizando meios elementares, conduzindo sempre à determinação de grandezas cinemáticas com apreciáveis precisão. Tais experiências tanto podem usar montagens clássicas, tal como a máquina de Atwood referida por COLLINGS e GREENSLADE (1989), como basear-se em equipamento existente, caso das calhas e mesas de ar usadas por MELO (1986) e PEREIRA e QUICK (1988). Do mesmo modo possibilita a concepção de instrumentos novos, como os desenvolvidos por MELO (1986), destinados ao estudo do movimento de rotação e do efeito da ressonância mecânica. Além disso, como referido por PEARCE (1988), existem múltiplas configurações de montagem, de acordo com os diferentes tipos de detectores existentes no mercado.

Um dos aspectos mais interessantes deste instrumento de medida é o facto de não ser necessário conhecer os promenores do processo de aquisição dos dados, para se poder interpretar os resultados. Tanto ao professor como ao aluno é apenas necessário apreender a natureza dos fenómenos envolvidos na aquisição dos tempos. Este facto permite que o instrumento possa ser usado a nível elementar. Além disso, e na generalidade, as montagens podem mesmo ser facilmente utilizadas pelo professor durante uma aula de exposição.

### 3.2. Radar ultra-sónico

Como os fotodetectores funcionam como detectores de passagem de objectos, a sua utilização obriga a que a trajectória em estudo seja conhecida previamente. Se tal não acontecer, é necessário utilizar um outro tipo de sensor, que assinala a posição do objecto, idêntico aos utilizados nas câmaras fotográficas de focagem automática (radar ultra-sónico) (PEARCE (1988)). O método consiste em enviar um sinal de ultra-sons, e detectar o respectivo eco. Uma vez conhecida a velocidade do som, é possível determinar a distância do objecto ao detector (ver fig. 4). Realizando diversas medições em intervalos de tempo idênticos, podemos derivar as diversas grandezas cinemáticas relevantes.

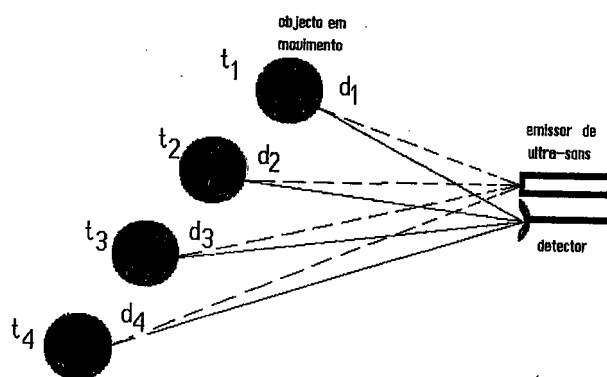


Fig. 4 — Esquema de funcionamento de um detector de posição de objectos (radar ultra-sónico). As distâncias ao detector são medidas em função do tempo decorrido entre a emissão de um sinal e a recepção do eco correspondente.

### 4. Grandezas analógicas

A utilização dos dois sensores referidos nos parágrafos anteriores, para estudos de cinemática, apenas exige que o computador possua uma interface de

comunicação com linhas de entrada do tipo digital. Se o fenómeno a estudar tiver uma variação contínua (grandeza analógica), a interface é necessariamente diferente, e baseia-se num circuito de electrónica que converte os sinais analógicos, com uma dada amplitude, num número inteiro entre 0 e uma potência  $n$  inteira de 2 (ver fig. 5). Este circuito é normalmente conhecido como

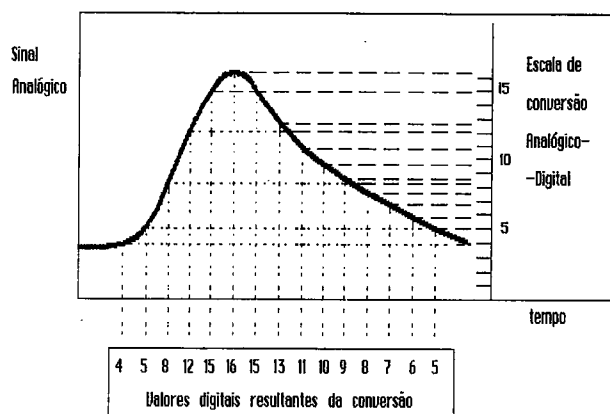


Fig. 5 — Esquema de funcionamento de um conversor analógico-digital. A amostragem é igualmente espaçada no tempo, e a escala discreta (digital) representada tem pelo menos 16 níveis distintos.

Conversor Analógico-Digital (ADC), sendo  $n$  a resolução do mesmo (em bits). Os valores mais comuns de  $n$  são 8, 10 ou 12. As interfaces de computador que integram tais circuitos (interfaces analógicas) admitem normalmente, como entrada, sinais em tensão entre 0 e 5 V ou entre -5 e 5 V.

Para que possamos medir o valor de grandezas físicas como a temperatura ou a pressão, é necessário dispor de sensores apropriados. Estes baseiam-se na variação de uma das características do sensor com a grandeza a medir. Por exemplo, um fio metálico pode ser considerado um sensor de temperatura, já que a sua resistência varia com a temperatura. Como as interfaces analógicas disponíveis medem tensões eléctricas, é necessário dispor de circuitos condicionadores que permitam transformar o sinal primário do sensor num sinal apropriado à interface, ou seja, efectuem o acoplamento entre esta e o sensor utilizado.

Vamos ilustrar o uso de uma interface analógica em duas situações distintas. na primeira medindo directamente tensões e na segunda usando um sensor de temperatura e um circuito condicionador apropriado. Do mesmo modo se medem outras grandezas analógicas através da mesma interface, uma vez encontrados os sensores apropriados (ver por exemplo PRIEST e SNIDER (1987)).

#### 4.1. Forças electromotrizes induzidas e a lei de Lenz

Consideremos uma bobine com um pequeno diâmetro (2 cm) e elevado número de espiras (500). Se dentro dela deslocarmos um íman, sabemos que nos seus terminais se pode medir uma tensão, proveniente da força electromotriz induzida pela variação do fluxo magnético que atravessa a bobina. A avaliação dessa força electromotriz é habitualmente feita através de um galvanómetro com escala de zero ao centro. O aluno é solicitado a observar o deslocamento da agulha num e noutro sentido da escala. No entanto, uma interface analógica pode ser utilizada em vez do galvanómetro, registando-se no computador a variação da tensão no tempo.

Consideremos um dispositivo experimental em que várias dessas bobinas se encontram ligadas em série, e montadas em torno de um tubo. Esta montagem foi inicialmente descrita por FOX *et al.* (1988) para estudo da queda de graves. Com efeito, se pelo interior do tubo, colocado na vertical, deixarmos cair um pequeno íman, nos terminais do conjunto das diversas bobinas registam-se, ao longo do tempo, vários sinais, conforme o íman vai atravessando ao longo da queda, cada uma das bobinas. Na montagem por nós efectuada o início da medida é determinado pela leitura da situação de fecho de um pequeno relé magnético, situado na secção inicial do tubo. Quando o íman se afasta, o relé fecha o circuito, o que provoca uma transição de nível, e conseqüentemente um sinal que pode ser lido na interface digital do computador, permitindo o início da medida da f.e.m. nos terminais do conjunto das bobinas. A sincronização não é no entanto perfeita, isto é, o relé fecha alguns milissegundos após o íman iniciar a queda.

A montagem encontra-se esquematizada na fig. 6, e consiste fundamentalmente em 6 bobinas de 500 espiras

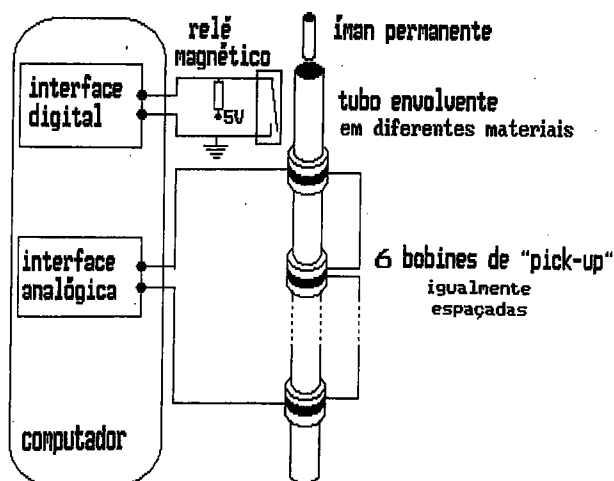


Fig. 6 — Esquema de montagem utilizado para estudo da lei de Lenz.

igualmente espaçadas ao longo do tubo de queda. O resultado obtido com um tubo envolvente de vidro vem na fig. 7. Observam-se 6 sinais (tantos quantas as bobinas montadas) com uma componente positiva seguida de uma componente negativa. Os nodos ocorrem em intervalos de tempo que variam na razão inversa do quadrado do tempo, e a amplitude dos sinais cresce linearmente com o tempo.

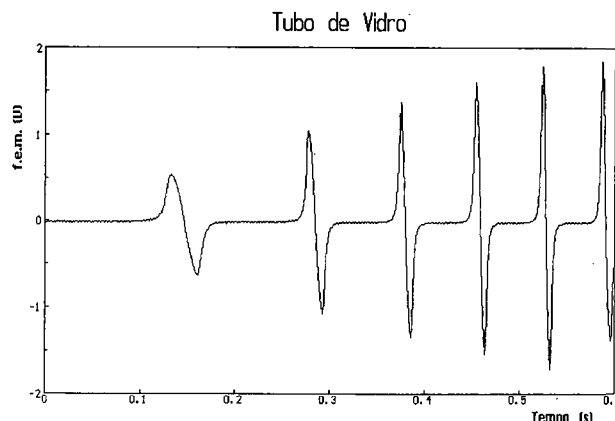


Fig. 7 — Resultado obtido da Fig. 6, utilizando um tubo envolvente de vidro. A parte negativa do sinal que corresponde à última bobina apresenta-se distorcida, provavelmente devido a perturbação na queda do íman à saída do tubo.

Sabemos da cinemática que quando um corpo cai livremente, espaços iguais são percorridos em intervalos de tempo que variam na razão inversa do quadrado do tempo. É esta situação que se verifica no gráfico da fig. 7, pelo que podemos concluir que o íman cai livremente no interior do tubo, apenas sujeito à acção da gravidade. Por outro lado, sabemos igualmente da cinemática que a velocidade cresce linearmente com o tempo. Ora, e ainda pela análise da fig. 7, se pode concluir que a amplitude máxima da f.e.m. induzida é proporcional à velocidade de passagem do íman. A forma do sinal produzido mostra também que o sinal da f.e.m. induzida é função da direcção do campo magnético do íman: positivo quando este se aproxima e negativo quando se afasta. Para testar esta hipótese basta efectuar a mesma experiência invertendo a posição do íman: a figura obtida é simétrica da anterior.

Se substituirmos o tubo de vidro onde se encontram montadas as bobinas por um outro com as mesmas dimensões mas de cobre, o resultado obtido (fig. 8), poderá ser considerado surpreendente. Os sinais são agora idênticos em amplitude e igualmente espaçados no tempo. Isto mostra que o íman não cai livremente dentro do tubo de cobre. Após os instantes iniciais da queda, desloca-se a velocidade constante (velocidade limite), tal como ocorre com um paraquedista. Esta experiência mostra que se

desenvolvem correntes induzidas no tubo de cobre, e que estas produzem um campo magnético de sinal contrário ao do íman. Alterando o material do tubo obterem os gráficos com comportamento intermédio entre os das figs. 7 e 8, e poderemos obter novas conclusões (GONÇALVES e MELO (1990)).

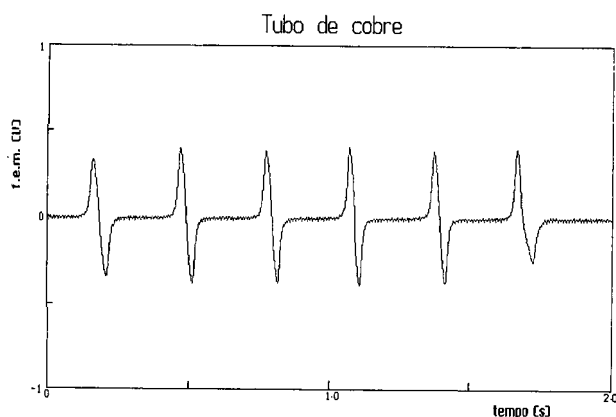


Fig. 8 — Resultado obtido em condições idênticas às da fig. 6, mas utilizando um tubo envolvente de cobre. Note-se que as escalas utilizadas são diferentes das da figura anterior.

A montagem utilizada neste trabalho põe em relevo que os conhecimentos num dado domínio permitem conceber instrumentos para observação de fenómenos noutra domínio. Neste caso, é a cinemática da queda de graves que permite observar fenómenos no domínio do electromagnetismo. Mais uma vez não é necessário conhecer os pormenores do processo de medida, mas tão somente entender os fenómenos físicos envolvidos para que os resultados permitam deduzir leis experimentais da Física.

#### 4.2. Medição de temperaturas

Consideremos agora a medição de uma temperatura. Como se disse, os sensores a utilizar baseiam-se em grandezas físicas que variam de modo conhecido com a temperatura (ver por exemplo PRIEST e SNIDER (1987) ou COLLINGS e GREENSLADE (1988)). Se utilizarmos uma resistência, a queda de tensão aos terminais desta, quando ligada a uma fonte de corrente constante, varia com a temperatura. O sensor por nós utilizado baseia-se num circuito integrado (LM 335), e o condicionador de sinal produz um sinal em tensão entre 0 e 2,5 V. A calibração do conjunto é efectuada de forma 0 V correspondam a 0°C, e 2,5 V a 100°C (MARQUES e GONÇALVES (1990)).

Tal como na medição directa de uma tensão, é possível o registo do valor da temperatura em sucessivos instantes, e a conseqüente representação gráfica da variação obtida. Começando por mergulhar o sensor em água tédida iniciou-se o registo da temperatura, passando em seguida o sensor para água quente. A temperatura foi registada durante 10 s. O resultado obtido encontra-se na fig. 9. Entre os dois valores extremos do gráfico, que correspondem às temperaturas das águas tédida e quente (que de acordo com a calibração do sensor efectuada previamente, são respectivamente de 26°C e 65°C), a resposta do sensor variou continuamente de modo exponencial.

Este exemplo ilustra outra das facetas dos processos de medida. Em primeiro lugar, é necessário saber se o conjunto sensor mais circuito condicionador de sinal tem uma resposta linear, e se encontra calibrado; em segundo lugar todo o sensor tem um tempo de resposta finito. No exemplo utilizado é necessário ter a certeza que o sensor é linear e está bem calibrado, para que as temperaturas medidas sejam de facto correctas. Por outro lado, o sensor utilizado tem uma constante de tempo da ordem da dezena de segundos, pelo que não poderemos medir variações de temperatura que ocorram em intervalos de tempo mais curtos que este.

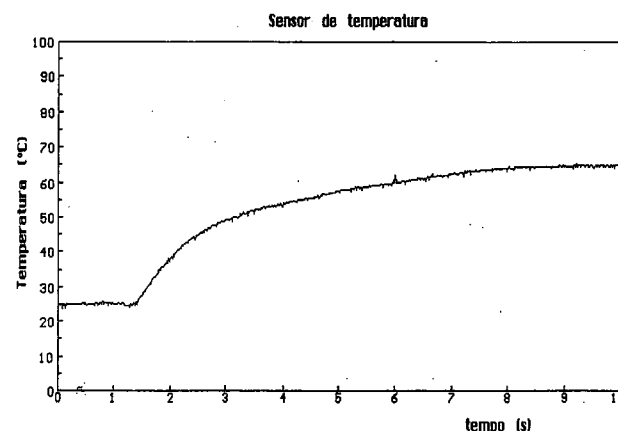


Fig. 9 — Medição da temperatura da água de dois recipientes. O sensor é inicialmente mergulhado naquele que se encontra a temperatura mais baixa, transferindo-se depois para o outro. A tracejado está indicado o comportamento ideal do sensor.

Obviamente lidamos neste caso com problemas específicos da própria instrumentação. O uso de sensores e respectivos circuitos condicionadores de sinal, eventualmente complexos, obriga a conhecer mais profundamente a natureza dos fenómenos envolvidos no processo de medida, limitando a sua aplicabilidade a cursos mais avançados.

## 5. Osciloscópio com memória

Até aqui consideramos medidas de tempos, determinados por sinais digitais, ou de grandezas analógicas que variam lentamente no tempo. No entanto, existe outro tipo de grandezas, de duração eventualmente curta, normalmente repetitivas mas não necessariamente periódicas, que não podem ser registadas pelos instrumentos descritos. Para registar tais grandezas é necessário: determinar o início da análise (detectar o sinal de «trigger»); efectuar um conjunto de leituras (conversões) em intervalos de tempo igualmente espaçados e eventualmente curtos (base de tempo); e repetir a amostragem sempre que um novo «trigger» é detectado. O instrumento convencional usado para este tipo de registo é o osciloscópio. Contudo, este não permite o registo quantitativo da(s) amostragem(ns), efectuada(s), e, por conseguinte, a análise posterior dos dados. Tal só é possível com um instrumento dotado de memória própria designado justamente «storage oscilloscope». Este pode ser emulado através de um computador, dotando-o de uma interface adequada (MELO *et al.* (1990)). Com este dispositivo, poderão ser analisadas, por exemplo, as ondas acústicas originadas por qualquer fonte sonora, e muito especialmente as originadas por um instrumento musical. A onda registada pode ser decomposta por análise de Fourier na componente fundamental e respectivos harmónicos, sendo os resultados imediatamente apresentados na forma gráfica.

## 6. Conclusões

O computador tornou-se parte integrante nos aparelhos de medida, assistindo no processo de aquisição de dados, na sua interpretação e na sua análise posterior. A miniaturização das componentes básicas dos computadores faz com que na vida diária utilizemos os mais vulgares instrumentos assistidos por microcomputadores, sem que tal se nos torne evidente. Mais importantes são as aplicações da instrumentação assistida por computador na indústria, quer nos laboratórios em que se procede ao controlo de qualidade, quer directamente regulando ou executando os próprios processos respectivos de fabrico (ou seja, em robots). Nestas circunstâncias não podemos deixar de considerar normal que a mesma metodologia seja utilizada nos instrumentos de ensino. O computador é o veículo privilegiado para a observação e compreensão de muitos dos fenómenos físicos do nosso universo. Isso permite repensar o processo de ensino com reforço da sua eficácia. Por outro lado, a utilização orientada do computador no laboratório reforçará de modo natural a componente tecnológica durante o período de formação,

proporcionando aos mesmos alunos maior qualificação profissional obtida por via escolar, com o consequente alargamento das potencialidades de emprego.

## Agradecimentos

Todas as experiências expostas neste trabalho resultaram de um trabalho de cooperação com o meu colega António A. Melo, sem a qual nunca teriam visto a luz do dia. A ele são devidos agradecimentos especiais pelo entusiasmo, esforço e amizade que me dispensou na preparação deste texto. Em algumas das realizações experimentais contámos com a colaboração dos nossos alunos de mestrado J. Marques e R. Oliveira, a quem são igualmente devidos agradecimentos especiais.

## BIBLIOGRAFIA

- COLLINGS, Peter J., GREENSLADE, Jr. Thomas B. (1989) — «Using the Computer as a Laboratory Instrument», *Physics Teacher*, 27, 2, pp. 76-84.
- FOX, J., GAGGINI, EDDY, J. (1988) — «Simple Free Fall Apparatus», *Physics Teacher*, 26, 2, pp. 108-109.
- GONÇALVES, A. M., (1985) — «Ensino Assistido por Computador: um guia de aplicações», *Gazeta de Física*, 8, 2, pp. 65-67.
- GONÇALVES, António M., MELO, António A. (1990) — «Observação da lei de Lenz», não publicado.
- MACKENZIE, J. Scott (1988) — «Issues and the Methods in the Microcomputer-Based Lab», *The Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching*, VII, 3, pp. 12-18.
- MARQUES, José, GONÇALVES, António M. (1990) — «Medição de temperatura assistida por computador», não publicado.
- MELO, António A. (1986) — «Trabalhos Práticos de Mecânica», *Dep. Física*, FCUL.
- MELO, António A., GONÇALVES, António M., MARTINS, Miguel M. (1987) — «Laboratório de Mecânica Assistido por Computador: uma experiência de ensino ao alcance de todos», *Gazeta de Física*, 10, 1, pp. 10-18.
- MELO, António A., GONÇALVES, António M., GONÇALVES, Manuel A. (1990) — não publicado.
- PEARCE, Jon M. (1988) — «Measuring speed using a computer-several techniques», *Physics Education*, 23, pp. 291-296.
- PEREIRA, Neves, QUICK, STUART M. (1988) — «A Method of Recording Rotational Motion on a Conventional Air Table», *Physics Teacher*, 26, pp. 170-172.
- PRIEST, Joseph, SNIDER, John (1987) — «Undergraduate Computer-Interfacing Projects», *Physics Teacher*, 25, 5, pp. 303-313.
- REDISH, Edward F., WILSON, Jack M. (1989) — *Physics Today*, 42, 1, pp. 34-41.
- THORNTON, Ronald K. (1987) — «Tools for scientific thinking-microcomputer-based laboratories for physics teaching», *Physics Education*, 22, 4, pp. 230-238.