Revista de Ensino de Física vol. 13 dez/1991 63-76

# AQUISIÇÃO DE DADOS COM A PORTA DE JOGOS DE MICROCOMPUTADORES APPLE
## (Data Acquisition Through the Game Port of Apple Microcomputers)

W.M.GONÇALVES, A.F.HEINRICH e J.C.SARTORELLI
*Instituto de Física*
*Universidade de São Paulo*
*Caixa Postal 20516*
*01498 São Paulo, SP*

**RESUMO**

**Usando-se um circuito eletrônico simples, desenvolveu-se um sistema de aquisição de dados através da porta de jogos de microcomputadores Apple. O programa de controle foi escrito em BASIC, que introduz as rotinas de aquisição de dados em linguagem de máquina. A montagem do sistema requer apenas um conhecimento elementar de eletrônica, de linguagem BASIC e de DOS. Como aplicativo foram estudadas a cinemática e a dinâmica de rotação de um disco rígido.**

**ABSTRACT**

A simple data acquisition system is introduced through the Apple's game port. The system setting requires only an elementary knowledge of electronics, Basic programming language and DOS. The routines built for data acquisition were written in the Assembler language, and are inserted by the main Basic program. As a demonstration, the kinematics and dynamics of a rigid rotating disk have been studied.

## INTRODUÇÃO

A "porta de jogos" do Apple constitui-se de um soquete de 16 pinos, montado diretamente na placa principal do microcomputador (*mother-board*), ao qual é normalmente conectado um *joystick*, usado em jogos.

Entretanto, uma vez que os sinais analógicos e digitais disponíveis nesse soquete podem ser controlados por *software*, a *porta de jogos* pode ser utilizada, entre outras possíveis aplicações, para a aquisição de dados.

Como aplicação deste sistema de aquisição, foi estudada uma experiência de movimento de rotação, tradicionalmente executada no IFUSP, chamada *Roda de Inércia*.

Os componentes eletrônicos necessários são de baixo custo e de montagem muito simples, não exigindo maiores conhecimentos de eletrônica. São necessários apenas conhecimentos elementares de BASIC e DOS para o Apple, para a introdução e operação do programa de controle. A aquisição de dados é feita por uma rotina em Linguagem de Máquina, a qual é introduzida pelo próprio programa de controle.

## O SISTEMA DE AQUISIÇÃO

Na entrada de jogos, alguns pinos correspondem às saídas e outros às entradas. A cada um desses pinos está associado um endereço na memória do Apple. Foi utilizado para a aquisição o pino 2 da entrada de jogos, que é uma entrada digital TTL, associada ao endereco 49249 ($CO61, em hexadecimal). Dos oito bits do conteúdo desse endereço, apenas o oitavo, o chamado bit de sinal tem significado: será setado (=1) para o nível lógico "1" ou ressetado (=0) para o nível lógico "0".

Colocando-se tensões dentro das faixas de 0 a 0.2 V e de 2.5 a 5 V (os níveis lógicos TTL "0" e "1"), respectivamente, no pino número 2 da entrada de jogos, o sinal do conteúdo do endereço 49249 será positivo para a primeira faixa e negativo para a segunda.

Na figura 1 tem-se o esquema do circuito utilizado. Quando o feixe de infra-vermelho emitido pelo foto-diodo ilumina a base do foto-transistor, o sinal emissor/coletor induzido é amplificado por um amplificador operacional (741) que coloca uma tensão acima de 2.5 V (dentro do nível 1, *claro*) no pino 2. Interrompendo-se o feixe, o sinal amplificado será menor que 0.2 V, e o nível 0 (*escuro*) é obtido.

Como o circuito é muito simples, acredita-se não haver necessidade de maiores detalhes sobre sua montagem.

Todo o circuito (figura 1) pode ser montado sobre uma pequena placa, com um soquete de 16 pinos que é conectado diretamente ao soquete da porta de jogos. Os cabos que ligam o foto-diodo e o foto-transistor ao circuito são coaxiais.

Para se diminuir as interferências devidas às fontes externas de infravermelho, colimou-se o feixe incidente no foto-diodo com uma fenda cilíndrica de 1.5 mm de diâmetro com 15 mm de comprimento, aproximadamente (figura 2a).

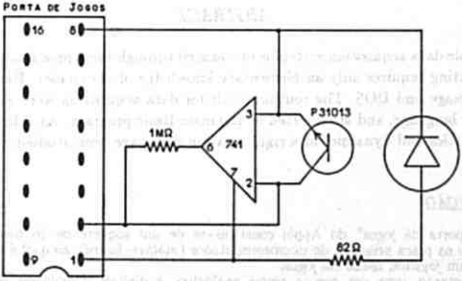


Figura 1

## *PROGRAMA*

Abaixo segue-se a listagem do programa BASIC, com o qual é possível checar o funcionamento do circuito de aquisição, realizar a aquisição de dados, e arquivá-los em disquete para uso e análise posteriores.

A introdução da rotina de leitura do endereco 49249, em linguagem de máquina, é feita na linha de número 20 da listagem abaixo, usando os dados nas instruções DATA das linhas de 130 a 290.

listagem

```
10    POKE 214,255
20    FOR I = 768 TO 1022: READ A: POKE I,A: NEXT
30    HOME
40    PRINT "AQUISICAO DE DADOS": PRINT : PRINT
      :PRINT"O)OSCILOSCOPIO": PRINT "A)AQUISICAO": PRINT
      "S)ARQUIVAR": PRINT "F)FIM"
50    PRINT : PRINT : PRINT "OPCAO >";: GET A$: PRINT
60    IF A$ = "O" THEN POKE 224,0: POKE 233,0: HGR : HCOLOR= 3: CALL 880:
      TEXT : GOTO 30
70    IF A$ = "A" THEN PRINT : PRINT : PRINT "PARA INICIAR, DIGITE
      ALGO>";: GET O$: PRINT : PRINT "APOS O ""BIP"" A LEITURA TEM
      INICIO."
80    IF A$ = "A" THEN HGR2 : HCOLOR= 3: POKE 224,0: POKE 228,0: POKE
      229,64: POKE 230,96: POKE 226,0: PRINT CHR$ (7): CALL 768: PRINT CHR$
      (7): TEXT : GOTO 30
90    IF A$ = "S" THEN MX = ( PEEK (228) + 256 * PEEK (229) - 2):IB = 16386:RX
      = (MX - IB) / 2:D$ = CHR$ (4): PRINT : INPUT "ARQUIVO:";N$
100   IF A$ = "S" THEN PRINT D$"OPEN";N$: PRINT D$"WRITE";N$: PRINT RX:
      FOR I = 1 TO RX: PRINT I: PRINT PEEK (IB + 2 * (I - 1)) + 256 * PEEK
      ((IB + 2 * (I - 1) + 1)): NEXT : PRINT D$"CLOSE";N$: GOTO 30
110   IF A$ = "F" THEN POKE 214,0: END
120   GOTO 30
130   DATA  169,0,133,225,133,233,166,224,173,1,192,189,97,192,48
140   DATA  251,76,56,3,160,0,165,225,145,228,200,165,233,145,228
150   DATA  165,228,24,105,2,133,228,165,229,105,0,133,229,165,226
160   DATA  56,229,228,165,230,229,229,144,57,166,224,189,97,192,48
170   DATA  6,32,78,3,76,56,3,32,78,3,189,97,192,16,200
180   DATA  76,67,3,165,225,24,105,1,133,225,165,233,105,0,133
190   DATA  233,176,16,173,0,192,48,11,164,227,136,234,234,234,234
200   DATA  234,208,248,96,104,104,96,173,1,192,76,191,3,234,160
210   DATA  38,32,136,3,177,231,200,145,231,136,136,192,255,208,242
220   DATA  96,234,166,233,202,224,255,208,251,96,166,224,189,97,192
230   DATA  48,3,76,174,3,160,0,200,189,97,192,16,7,192,128
240   DATA  240,3,76,157,3,136,76,190,3,160,128,200,189,97,192
250   DATA  48,7,192,0,240,3,76,176,3,136,96,169,34,133,232
260   DATA  169,0,133,231,32,118,3,169,35,133,232,169,40,133,231
270   DATA  32,118,3,32,145,3,152,10,144,3,76,236,3,169,255
280   DATA  141,40,35,169,0,141,0,34,76,191,3,169,255,141,0
290   DATA  34,169,0,141,40,35,173,0,192,48,3,76,191,3,96
```

Após ter digitado todas as linhas da listagem, salve o programa com SAVE AQUISICAO.

*COMO OPERAR O PROGRAMA*

Rode o programa aquisição com RUN AQUISICAO. Aparecerá na tela o menu de operação:

O) OSCILOSCOPIO
A) AQUISICAO
S) ARQUIVAR
F) FIM

OPCAO>_

Para escolher a opção desejada simplesmente digite a letra correspondente O, A, S ou F.

A opção OSCILOSCOPIO testa a montagem do circuito. Interrompa o feixe de infra-vermelho algumas vezes com um cartão. As transições entre os níveis 0 e 1 (claro/escuro) podem ser observadas na tela de vídeo.

A opção AQUISICAO é o programa propriamente dito. Ao escolher esta opção aparecerá na tela a seguinte mensagem:

PARA INICIAR QUALQUER TECLA_

A leitura só terá início quando houver a primeira transição de claro para escuro. Portanto, tenha o foto-transistor iluminado antes de digitar qualquer tecla. Após a leitura ter começado, um contador de tempo será incrementado de 1 a cada 1.5 milisegundos aproximadamente. Quando das transições claro/escuro subseqüentes, o valor do contador de tempo é armazenado em endereços sucessivos na memória do Apple, na chamada *pagina 1 de graficos de alta resolucao*, à partir do endereco 8192. Dessa maneira, este armazenamento pode ser acompanhado observando-se os pontos que aparecem na tela de vídeo.

Quando desejar encerrar a aquisição de dados, pressione qualquer tecla e o menu de operação voltará à tela. Ao escolher a opção ARQUIVAR, a mensagem:

NOME DO ARQUIVO= _

é mostrada. Entre com o nome do arquivo para armazenar os dados no disquete na seguinte seqüência:

| | |
|---|---|
| primeiro dado | número de pontos |
| segunda dado | D(1) |
| terceiro dado | X(1) |
| 4 | D(2) |
| 5 | X(2) |
| . | . |
| . | . |

onde os D's são os números de transições claro/escuro e os X's são os valores correspondentes do contador de tempo. Os dados armazenados no disquete estarão disponíveis para futura análise de acordo com o interesse do usuário. A conversão para unidades de tempo é dada pela expressão:

$$t(i) = (62 + 1551 \times X(i)) \times 9.7885094 \times 10^{-7} \text{ segundos.} \qquad (1)$$

Esta calibração foi feita usando-se o relógio interno do microcomputador, e não depende da marca ou modelo de Apple.

A resolução de 1.5 milisegundos limita o tempo total de medida a cerca de 1.5 minutos e a um número máximo de dados da ordem de 4000. A leitura cessará caso uma tecla seja pressionada ou automaticamente, caso um dos parâmetros máximos acima seja atingido.

No exemplo a seguir, são levantadas as equações do movimento de rotação de um disco, que permitirão calcular o seu momento de inércia, coeficiente de atrito, etc. Neste caso D contém o número de voltas ( X sempre contém os valores do contador).

A presente análise dos dados foi feita com um programa, escrito em BASIC, que contém rotinas de ajuste de curvas (reta, parábola), amaciamento, tabelas de forma, etc.

Os gráficos apresentados foram obtidos com uma impressora matricial, imprimindo-se diretamente a saída gráfica do programa.

Este programa não será aqui apresentado devido à sua longa listagem.

## *RODA DE INÉRCIA*

Na figura 2 temos o desenho do sistema da roda de inércia utilizado.

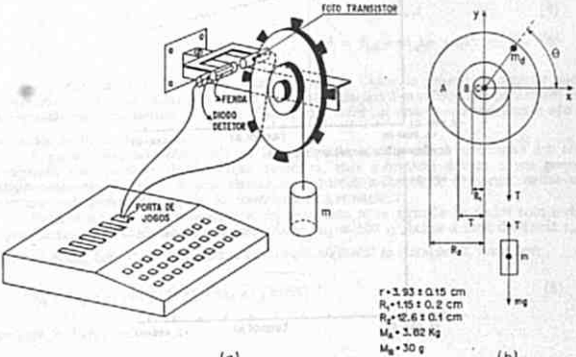


Figura 2

O sistema consiste de um disco de ferro (A) e um de acrílico concêntricos (B), montado com rolamento (C) em um eixo horizontal, a 1.80 m de altura (vide dimensões na figura 2b). Sobre o de acrílico é enrolado um fio, com uma das extremidades laçada em um pino nele fixado; na outra é presa uma massa m que ao cair acelera o conjunto. O fio, quando totalmente desenrolado, desprende-se e o sistema passa a ser desacelerado pela ação do atrito. As 8 aletas montadas sobre o disco de ferro interrompem o feixe de infra-vermelho a cada 45 graus, vide figura 2a.

Na figura 3 são apresentados os gráficos do número de rotações, da velocidade e aceleração angular versus tempo (figuras 3a, 3b e 3c respectivamente), com m=63g

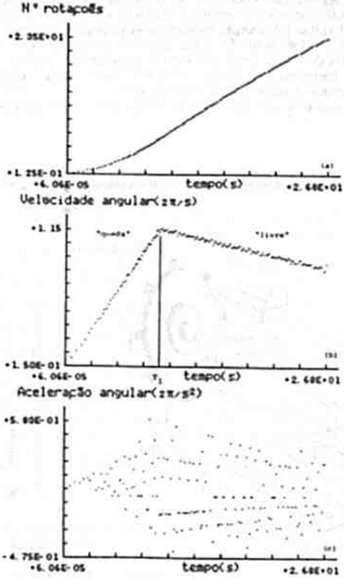


Figura 3

As derivadas foram calculadas numericamente, ajustando-se uma parábola a cada 3 pontos experimentais. O adensamento observado nas figuras é devido à grande quantidade de pontos graficados, da ordem de 200, próximo do limite de resolução gráfica do microcomputador (280 x 160 pontos).

Os trechos de aceleração (de "queda") e de desaceleração ("livre") são claramente observados no gráfico da velocidade angular (figura 3b).

As equações que descrevem o movimento nos dois trechos são dadas por:

"queda" "livre"

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = T\,r - \tau_{atq} \qquad\qquad I \frac{d^2\theta}{dt^2} = -\,\tau_{atl} \tag{2}$$

onde I é o momento de inércia do sistema, T é a tração no fio, $\tau_{atq}$ e $\tau_{atl}$ são os torques devido ao atrito em cada trecho.

Considerando-se $\tau_{atq}$ e $\tau_{atl}$ constantes obtém-se:

"queda" "livre"

$$\alpha_q = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \alpha_m - \alpha_{atq} \qquad \alpha_l = \frac{d^2\theta}{dt^2} = -\alpha_{atl} \tag{3}$$

onde $\alpha_m >> \alpha_{atq}$ e $\alpha_{atl}$ ($\alpha_m$, $\alpha_{atq}$ e $\alpha_{atl}$ são respectivamente as acelerações devidas à massa m, ao atrito de "queda" e ao atrito "livre").

As velocidades angulares e os repectivos deslocamentos angulares são:

"queda" "livre"

$$\omega_q = \omega_{qo} + \alpha_q t \qquad \omega_l = \omega_{lo} + \alpha_l t \tag{4}$$

$$\theta_q = \theta_{qo} + \omega_{qo}t + \tfrac{1}{2}\alpha_q t^2 \qquad \theta_l = \theta_{lo} + \omega_{lo}t + \tfrac{1}{2}\alpha_l t^2 \tag{5}$$

O gráfico da figura 3b mostra claramente que os dados da velocidade angular podem ser descritos pelas retas dadas pelas equações 4. As equações 3 prevêem dois patamares para a aceleração, correspondentes a $\alpha_q$ e $\alpha_l$. Entretanto, estes patamares aparentemente não são observados na figura 3c.

A grande dispersão observada na figura 3c não é só devida à ampliação dos erros, introduzida pelo processo de derivação numérica, mas sobretudo devido a um pequeno desbalanceamento do disco, o qual visiualmente parece balanceado. Portanto, existe uma componente da aceleração que não foi considerada na equação 2.

Para se estudar esta componente, foi feita uma nova tomada de dados com o disco propositadamente desbalanceado por uma massa $m_d$ = 100 g, fixada a uma distância $r_d$ do centro do disco. Esta massa $m_d$ produz um torque adicional as equações 2, dado por:

$$\tau_d = m_d\, g\, r_d \,\mathrm{sen}(\pi/2-\theta) = m_d\, g\, r_d \cos(\theta) \tag{6}$$

com 6 em 2 obtém-se:

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2} = \tau + g\, m_d\, r_d \cos(\theta) \tag{7}$$

onde $\tau = T\,r - \tau_{atq}$ ou $\tau = -\tau_{atl}$

A equação 7 pode ser reescrita na forma:

$$\alpha_t = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \alpha_o + A_d \cos(\theta) \tag{8a}$$

onde $\alpha_o = \tau / I$ e $A_d = g\, m_d\, r_d / I$, ou em termos do número de voltas n:

$$\alpha_t = \frac{d^2 n}{dt^2} = \alpha_o + A_d \cos(2\pi\, n) \tag{8b}$$

(nesta última equação $\alpha_o$ e $A_d$ são medidos em unidades de $2\pi$).

Observe que, independente do tipo de solução das equações 8, o valor médio de $\alpha_t$, tomado em algumas voltas, é aproximadamente $\alpha_0$, pois a média de $\cos(2\pi n)$ é nula em um número inteiro de voltas.

Como $\alpha_0$ representa um valor médio do movimento, pode-se obtê-lo ajustando uma curva média aos dados experimentais: uma parábola para n x t ou uma reta para $\omega$ x t.

Como soluções aproximadas para n, $\alpha$ e $\omega$ tem-se as expressões abaixo:

$$n \cong \bar{n} + n_d \cos(2\pi \bar{n}) \tag{9a}$$

$$\alpha \cong \alpha_0 + \alpha_d \cos(2\pi \bar{n}) \tag{9b}$$

$$\omega \cong \omega_0 + \alpha_0 t + \omega_d \cos(2\pi \bar{n} + 2\pi/4) \tag{9c}$$

onde $n_d$, $\alpha_d$ e $\omega_d$ são as respectivas amplitudes de oscilação e

$$\bar{n} = n_0 + \omega_0 t + \tfrac{1}{2}\alpha_0 t^2 \tag{10}$$

com $n_0$, $\omega_0$ e $\alpha_0$ obtidos dos ajustes por mínimos quadrados dos dados experimentais.

Para pequenos intervalos de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$ , mas que envolvem algumas voltas do disco, a variação de $\bar{n}$ em torno de $\langle t \rangle = \frac{1}{2}(t_2 + t_1)$ é aproximadamente:

$$\bar{n}(t) \simeq \bar{n}(\langle t \rangle) + \frac{d\bar{n}}{dt}\Big|_{\langle t \rangle}(t - \langle t \rangle) = (\omega_0 + \alpha_0 \langle t \rangle)(t - \langle t \rangle) + \bar{n}(\langle t \rangle) \tag{11}$$

Reescrevendo as equações 9 com 11, obtém-se,para $t_1 \leq t \leq t_2$ :

$$n \cong \bar{n} + n_d \cos(2\pi \langle \bar{\omega} \rangle t + \varphi) \tag{12a}$$

$$\alpha \cong \alpha_0 + \alpha_d \cos(2\pi \langle \bar{\omega} \rangle t + \varphi) \tag{12b}$$

$$\omega \cong \omega_0 + \alpha_0 t + \omega_d \cos(2\pi \langle \bar{\omega} \rangle t + \varphi + 2\pi/4) \tag{12c}$$

,onde $\langle \bar{\omega} \rangle = \omega_0 + \alpha_0 \langle t \rangle$ e $\varphi = - \langle \bar{\omega} \rangle \langle t \rangle + \bar{n}(\langle t \rangle)$

Estas equações são então periódicas, com período $T_c = 1 / \langle \bar{\omega} \rangle$, em torno de $\langle t \rangle$, isto é, o período depende da velocidade angular média no intervalo $\Delta t$ considerado.

Na figura 4a e 4b são mostradas, respectivamente, a velocidade e a aceleração angulares obtidas com o disco desbalanceado com $m_d = 100$ g.

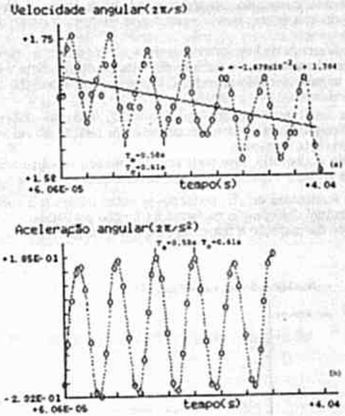


Figura 4

O intervalo de tempo é de 0 a 4.04 segundos. O período de oscilação, $T_e$, é a distância entre os máximos (ou mínimos) dos gráficos da velocidade e aceleração angulares.

A reta em 4a foi obtida por mínimos quadrados, cujos parâmetros correspondem respectivamente a $\alpha_0$ e $\omega_0$, com os quais calculou-se $T_c$.

Este procedimento foi repetido para mais dois intervalos de tempo (de 15.2 a 19.5 s e de 32.9 a 37.9 s). Os resultados estão na tabela 1.

tabela 1

| $t_1$(s) | $t_2$(s) | <t>(s) | $\alpha_0(2\pi/s^2)$ | $\omega_0(2\pi/s)$ | $<\bar{\omega}>(2\pi/s)$ | $T_c^*$(s) | $T_e^{\#}$(s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 4.04 | 2.02 | $-1.679\ 10^{-2}$ | 1.704 | 1.67 | 0.61 | 0.58 |
| 15.2 | 19.5 | 17.35 | $-2.063\ 10^{-2}$ | 1.735 | 1.38 | 0.73 | 0.72 |
| 32.9 | 37.9 | 35.4 | $-2.058\ 10^{-2}$ | 1.753 | 1.02 | 0.98 | 1.01 |

* Calculado com $T_c = 1 / <\bar{\omega}> = 1 / (\omega_0 + \alpha_0 <t>)$

\# Distância média entre os máximos (ou mínimos) das figuras 4.

Observa–se que o modelo proposto é adequado para descrever as componentes periódicas através da boa concordância encontrada entre os valores de $T_c$ e $T_e$, para cada intervalo de tempo.

O valor da diferença de fase entre a aceleração angular e a velocidade angular (figura 4) encontrada é aproximadamente a metade do valor esperado. Esta discrepância deve–se ao fato da acelaração angular ter sido amaciada, o que desloca a posição dos máximos/mínimos de maneira não previsível.

Voltando a analisar os dados da figura 3c, convém notar que, neste caso, a componente periódica tem uma pequena amplitude, em relação ao ruído dado principalmente pelo processo de derivação numérica.

Como o ruído é aleatório, este pode ser minimizado substituindo cada dado na figura 3c pela média com o dado vizinho. Fazendo–se este processo de amaciamento N vezes, a relação sinal/ruído aumentará de $\sqrt{N}$, podendo–se então observar a componente periódica da aceleração, com eventual deformação da forma da função periódica.

Para efeito de comparação a figura 3c é repetida em 5a.

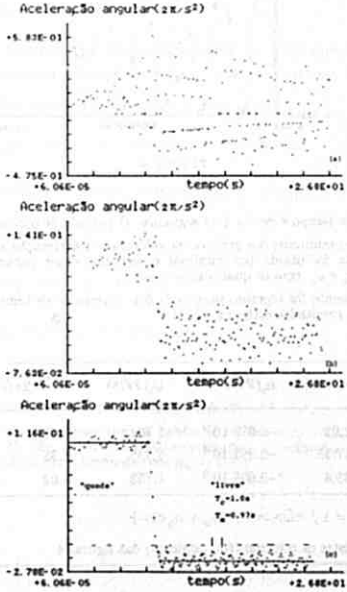


Figura 5

Na figura 5a temos o gráfico da aceleração sem nenhum amaciamento. Na figura 5b temos o efeito do amaciamento para N = 5, na qual a componente periódica começa a ficar perceptível. Em 5c o amaciamento foi feito 15 vezes, e mostra claramente a componente periódica da aceleração. Observe-se que no trecho de "queda", no qual a variação da velocidade é grande, há uma grande variação no período de oscilação. Obviamente, a solução aproximada, obtida anteriormente, não é válida neste trecho. No trecho "livre", no qual a variação de velocidade é pequena, o período de oscilação é praticamente constante. O valor médio do período tomado nas 14 oscilações da figura 5c resultou em $T_e = 0.97$ s, em boa concordância com o valor calculado, $T_c = 1.0$ s. Na figura 5c os patamares da aceleração estão claramente visíveis.

## *MOMENTO DE INÉRCIA*

As equações do movimento, desprezando-se o pequeno desbalanceamento, durante a "queda", são dadas por (os parâmetros referem-se à figura 2):

$$\begin{cases} m\,g - T = m\ \alpha_q\, r \\ T\, r - \tau_{atq} = I\, \alpha_q \end{cases} \tag{13}$$

onde $\tau$ é o torque devido ao atrito, que pode ser calculado através de:

$$\begin{cases} \tau = \mu\, N\, r_0 \\ N = M_t\ g + T \end{cases} \tag{14}$$

onde $r_0$ é uma distância efetiva de aplicação da força de atrito, N é a força normal e $M_t$ é a massa do disco de ferro acrescida da massa do disco de acrílico de raio r.

Durante o movimento "livre" o único torque no sistema é o de atrito, cujo módulo é dado por:

$$\begin{cases} \tau = \mu\, N\, r_0 = I\, \alpha_l \\ N = M_t\ g \end{cases} \tag{15}$$

Das equações 13, 14 e 15 obtém-se o momento de inércia :

$$\begin{cases} I = \dfrac{T\, r}{\alpha_q + \alpha_l + \dfrac{\alpha_l\, T}{M_t\ g}} \\ T = m\ (g - \alpha_q r) \end{cases} \tag{16}$$

Então I pode ser determinado conhecendo-se $M_t$, m, r, $\alpha_q$ e $\alpha_l$ , e comparado com o valor obtido através do cálculo geométrico:

$$I = M_t \frac{R_1^2 + R_2^2}{2} = 3.11 \pm 0.03\ 10^{-2}\ \mathrm{Kg\ m^2} \tag{17}$$

Na figura 6 tem-se os ajustes lineares nos trechos de "queda" (6a) e "livre" (6b), cujos coeficientes angulares são, respectivamente, $\alpha_q$ e $\alpha_l$, em unidades de $2\pi$/s. Os mesmos também podem ser obtidos ajustando-se parábolas, nos trechos correspondentes do gráfico da figura 3a. O momento de inércia é obtido então pela equação 16.

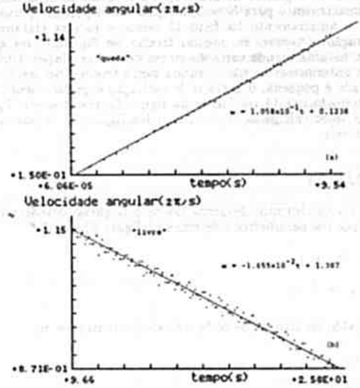


Figura 6

Repetiu–se o processo para diferentes valores de m, e os resultados encontram–se na tabela abaixo:

tabela 2

| m±0.001(kg) | $\alpha_q$ $(2\pi/s^2)^*$ | $\alpha_l$ $(2\pi/s^2)^{\#}$ | I $(kg.m^2x10^{-2})$ |
|---|---|---|---|
| 0.063 | 0.1058±0.0006 | 0.0166 | 3.14±0.07 |
| 0.114 | 0.2020±0.0014 | 0.0161 | 3.17±0.05 |
| 0.163 | 0.3010±0.0024 | 0.0156 | 3.12±0.05 |
| 0.214 | 0.3948±0.0039 | 0.0161 | 3.15±0.05 |
| 0.263 | 0.4948±0.0057 | 0.0154 | 3.11±0.05 |
| 0.313 | 0.5910±0.0071 | 0.0157 | 3.10±0.05 |
| 0.413 | 0.782 ±0.011 | 0.0150 | 3.10±0.06 |
| 0.713 | 1.348 ±0.026 | 0.0153 | 3.08±0.07 |
| 0.913 | 1.714 ±0.037 | 0.0152 | 3.08±0.08 |
| valores médios | | 0.0157±0.0005 | 3.12±0.07 |
| I calculado geometricamente: | | | 3.11±0.03 |

* As incertezas foram estimadas supondo–se uma incerteza de 15ms nas medidas de tempo

# As incertezas estimadas mostraram–se incompatíveis com o desbalanceamento esperado. Portanto, atribuimos uma incerteza de 0.0005, para todas elas, dada pelo cálculo da média.

A tabela 2 mostra que a aceleração de atrito ($\alpha_1$) no trecho livre é constante, como esperado, e que os valores obtidos para o momento de inércia para os diferentes valores de m estão em boa concordância como o valor calculado geometricamente.

Pode-se estimar o valor do coeficiente de atrito supondo-se que o torque da força de atrito é aplicado a uma distância que corresponde ao centro das esferas do rolamento $r_o = R_1 = 1.15 \pm 0.2$cm. Com a equação 6 obtém-se $\mu = I\ \alpha_1 / (M_t\ r_o) = 0.07 \pm 0.01$.

## CONCLUSÕES

Demonstrou-se que a entrada de jogos de microcomputadores Apple, que normalmente passa desapercebida, pode ser usada de uma maneira simples e eficiente. No aplicativo apresentado, mostrou-se que a experiência da Roda de Inércia fica muito enriquecida, pois além da cinemática de rotação pode-se estudar também a dinâmica com detalhes realçados pela boa sensibilidade do sistema.

## LEGENDAS

Figura 1: Circuito utilizado no sistema de aquisição de dados.

Figura 2: a) Sistema de roda de inércia com o de aquisição. b) Detalhe mostrando as dimensões dos discos utilizados A-disco de ferro, B-disco de acrílico, C-rolamento.

Figura 3: a) Gráfico do deslocamento angular em unidades de $2\pi$ (número de voltas). b) Gráfico da velocidade angular mostrando os trechos de "queda" e "livre", e $T_1$ instante em que o fio se desprende do disco de acrílico. c) Gráfico da aceleração angular. (m = 63g)

Figura 4: a) Gráfico da velocidade angular do disco desbalanceado por $m_d$ = 100g. A reta média contínua foi obtida por mínimos quadrados. b) Gráfico da aceleração angular após ter sido amaciada 10 vezes. Em ambos os casos, pode-se observar o efeito da componente periódica. As linhas pontilhadas são apenas guias visuais.

Figura 5: Gráficos da aceleração angular do disco aparentemente balanceado após a aplicação do processo de amaciamento, N = 1 em a, N = 5 em b e N = 15 em c, mostrando o aparecimento dos patamares.

Figura 6: a) Ampliação do trecho de "queda" da figura 3b, e b) do trecho "livre", com os respectivos ajustes de reta.

## BIBLIOGRAFIA


1) Allen Watson
Apple IIe – Reference Manual
Apple Computer Inc., California, 1982

2) B.W.Schoen
Assembly 6502
Aleph Publicações, São Paulo, 1985

3) F.M.Mims III
Engineer's Mini-Notebook
Op-Amp IC Circuits.
Radio Shack, Tandy Co., USA.

4) L.Poole, M.McNiff, S.Cook
Apple II – Guia do Usuário – Apple II Plus and Apple IIe
McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1985, 2. edição.

5) P.Horowitz, W.Hill
The art of electronics
Cambridge University Press, Cambridge, 1983

6) Apostila de Laboratório de Física II
Laboratório Didático
IFUSP, São Paulo.

*AGRADECIMENTOS*

Ao Prof. Ernst Wolfgang Hamburger e aos técnicos Cidemar Forcemo, Wilson Luís da Silva e Cosme Ferreira da Ponte Neto.

*Original recebido dos autores em 14/12/89*

*Aceito para publicação em 19/04/91*