

## CONSTRUÇÃO DE UM CRONÔMETRO AUTOMÁTICO-MANUAL E FREQUÊNCÍMETRO E SUA UTILIZAÇÃO EM EXPERIMENTOS DE FÍSICA BÁSICA

CARLOS ALBERTO PELÁ, ANTONIO JOSÉ PIO GHILARDI E THOMAZ GHILARDI NETTO

Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto - USP

Área de Física

Av. Bandeirantes, 3900 - 14040 Ribeirão Preto, SP

### RESUMO

Neste trabalho apresentamos a construção de um cronômetro e frequencímetro para uso principalmente em experimentos de Física Básica. A sua utilização é mostrada no caso clássico de um corpo em queda livre, onde analisamos a cinemática de deslocamento do corpo e medimos a aceleração local da gravidade. Detalhes do experimento são também discutidos com a finalidade de melhorar a precisão das medidas.

### INTRODUÇÃO

Inúmeros são os experimentos em Física Básica que envolvem medidas do intervalo de tempo correspondentes ao deslocamento de corpos no espaço. No laboratório muitos destes experimentos encontram limitações para serem realizados quando os intervalos de tempo são relativamente curtos e impedem a cronometragem manual.

Com a finalidade de complementar, bem como diversificar muitos dos nossos experimentos, desenvolvemos um cronômetro digital automático de baixo custo, eletrônica simples e fácil montagem e de uso já rotineiro em nossos laboratórios de ensino e pesquisa a alguns anos.

O instrumento incorpora também as funções para cronometragens manuais e medida de frequência, onde com esta última, cobrimos outro grande número de experimentos relativos principalmente a medidas de rotações ou vibrações.

## Características Gerais do Cronômetro-Freqüencímetro

Na configuração que apresentamos a seguir, o instrumento apresenta indicação com quatro dígitos, mas podendo ser facilmente expandidível conforme necessidades e precisão desejadas.

As bases de tempo podem ser selecionadas para os valores: 0,001; 0,01; 0,1 e 1 segundo.

Os sensores para detecção de posição, tanto para cronômetros como medidas de rotações, usam lâmpadas de tungstênio e fotodiodos sensíveis na faixa infravermelho-visível.

O sistema de focalização de luz sobre o fotodiodo permite precisão da posição em um eixo e maior indeterminação em um outro eixo perpendicular, de modo que fios de suspensão para os corpos possam ser utilizados.

Em usos mais gerais, sinais elétricos, em nível TTL, com frequências de até 10 MHz poderão ser lidas, adaptando-se entrada direta para os contadores. A faixa de frequências poderá ainda ser estendida com a incorporação de um divisor de frequências ("Prescaler") na entrada do sinal.

### Detetor de Posição

A figura 1 apresenta um corte esquemático do dispositivo usado como detetor de posição. Uma lâmpada de tungstênio (12 V - 150 mA) alimentada com tensão eficaz de 7,5 volts é utilizada como fonte luminosa. Uma lente de acrílico plano-convexa com 5 mm de raio focaliza o filamento da lâmpada sobre o fotodiodo. Uma fenda de 2 x 10 mm situada no plano da lente formata o feixe de luz de modo que, um fio com cerca de 1 mm de diâmetro, ao atravessar a região intermediária (lâmpada-fotodiodo) somente bloqueia o feixe de luz sobre o fotodiodo quando seu eixo coincide com o plano do desenho. Isto permite que os fios de suspensão dos corpos não causem interrupção do feixe de luz.

Dois detetores de posição com fotodiodos ligados em série possibilitam cronometrar o tempo de deslocamento dos corpos, onde um deles dispara o cronômetro no momento que o feixe de luz é bloqueado e o outro detetor interrompe o cronômetro quando o feixe de luz é blo

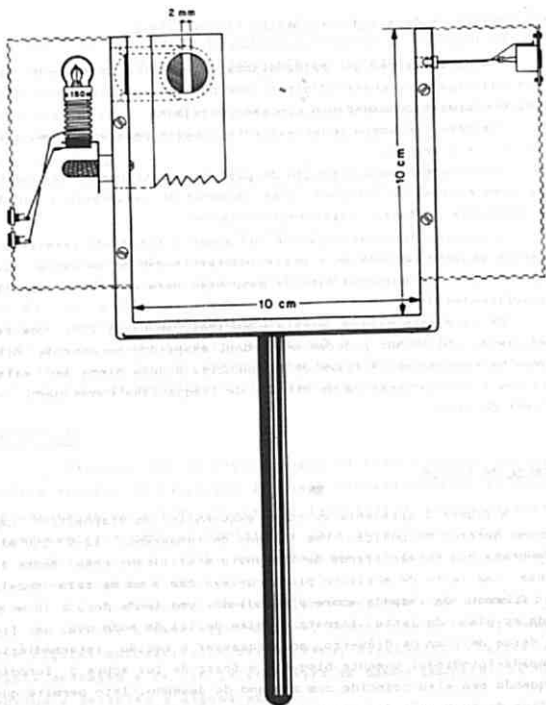


Figura 1 - DETETOR DE POSIÇÃO

queado novamente. O importante a ser observado é que a transição "contar-não contar" ou vice versa, ocorre exatamente e somente no início do bloqueio do feixe. Portanto o corpo deve ter dimensões menores

do que a distância entre detetores para liberar o feixe no primeiro detetor e interrompê-lo novamente no segundo. A precisão na posição dos corpos é de cerca de 1 mm.

O dispositivo em forma de "U" pode ser fixado facilmente, e corpos com variadas formas e dimensões podem ser utilizados, preferindo-se entretanto, para movimentos na vertical, objetos com formato cilíndrico cujo eixo coincide com o da trajetória, melhorando com isto a precisão na posição, principalmente quando a trajetória tem certa indeterminação.

Para medidas de frequência, seja em oscilações ou rotações, pode-se usar somente um detetor, posicionado de modo que o sistema bloqueie e libere o feixe de luz conforme oscile, sendo para isso necessários deslocamentos da ordem de 1 mm.

### Circuito Eletrônico

O diagrama em blocos do instrumento pode ser visto na figura 2 onde temos o controle, a base de tempo, o contador decimal e o interfaciamento para acionamento manual e automático, sendo que este último é utilizado nos modos de cronômetro e freqüencímetro.

O circuito eletrônico do instrumento como um todo, pode ser visto na figura 3, onde podemos identificar isoladamente cada um dos blocos acima mencionados.

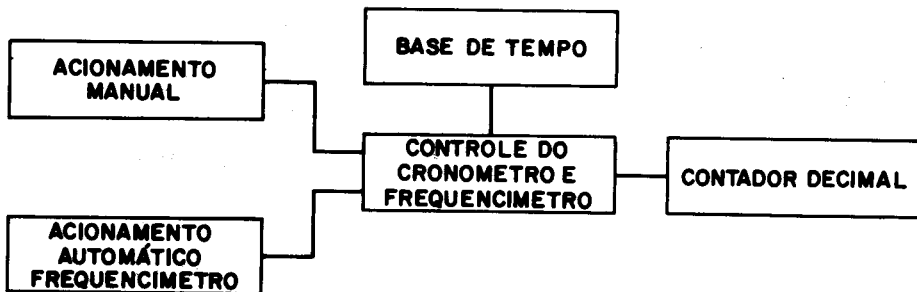
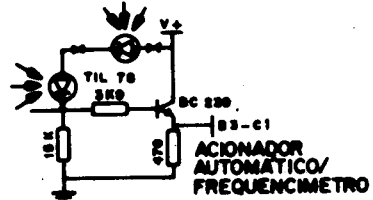
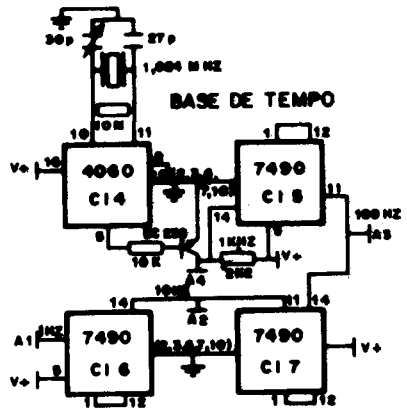
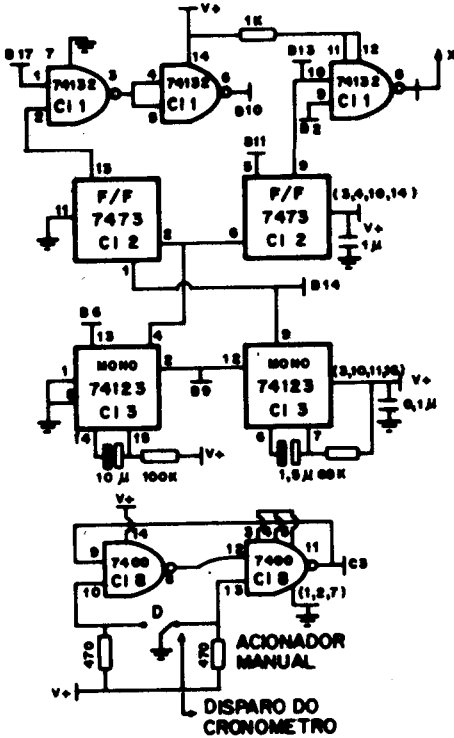


Figura 2 - DIAGRAMA EM BLOCOS DO INSTRUMENTO

FUNÇÕES DE CONTROLE



(100 HZ) SELETOR DA BASE DE TEMPO

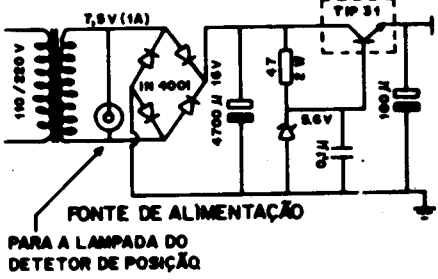
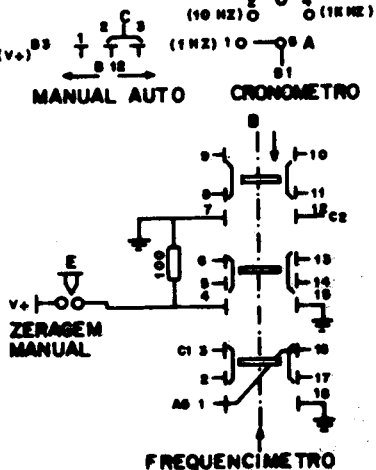


Figura 3 - ESQUEMA ELETRÔNICO (RESISTORES EM OHMS - 1/8 W E CAPACITORES EM FARADS)

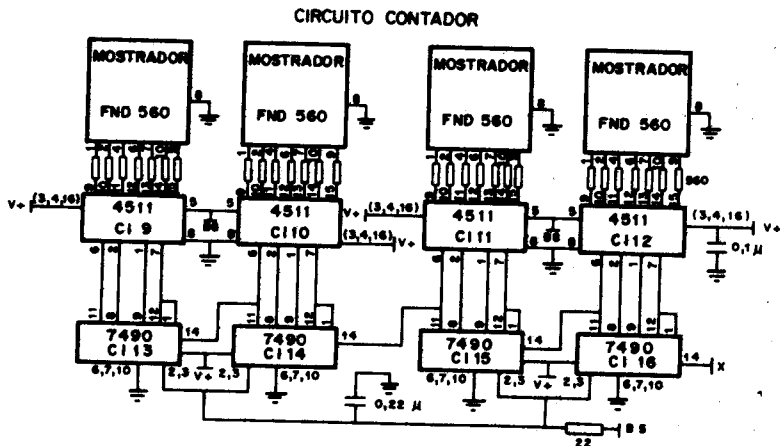


Figura 3 - Continuação.

### Circuito de Controle

Este circuito é a parte central do instrumento e tem por função selecionar os modos de operação do freqüencímetro e cronômetro, seja manual ou automático. O controle é composto dos circuitos integrados CI 74132 (4 portas NE com "Schmitt Trigger"), CI 7473 (2 "Flip-Flops"), CI 74123 (2 multivibradores monoestáveis) e as chaves seletoras B e C.

No modo freqüencímetro as formas de onda em diversos pontos do circuito podem ser vistas na figura 4. Essencialmente o seu funcionamento consiste em que um pulso com duração de um único período da base de tempo aplicada em B17 chegue à entrada da porta NE(B13). Este pulso se repete a intervalos de poucos décimos de segundo e deverá permitir, enquanto se mantiver em nível alto, que eventos a serem contados (amostragem) na forma de pulsos em nível TTL aplicados em B2 cheguem até o contador decimal. A seleção dos pulsos de controle, bem como do intervalo de tempo entre os mesmos é feita com auxílio dos "Flip-Flops" do CI 7473 e dos multivibradores do CI 74123.

Durante o período entre amostragens são efetuados os controles de transferência da contagem (B9) e zeramento dos contadores (B6).

intervalo de tempo entre as amostragens corresponde à soma dos tempos de atividade de cada multivibrador monoestável que depende de  $R(k\Omega)$  e  $C(\mu F)$  segundo a expressão

$$t = 0,32RC(1 + \frac{0,7}{R}) \text{ (milisegundos)}$$

O uso de portas NE com "Schmitt Trigger" se justifica nas medidas de baixas frequências porque na recepção, os pulsos provenientes dos fotodiodos, além de ruidosos, podem apresentar tempos de subida muito longos, que ocasionariam falsas contagens.

No modo cronômetro, com relação ao circuito de controle, somente se utiliza uma das portas NE e um "Flip-Flop" do circuito. A porta controla a passagem dos pulsos gerados na base de tempo para os

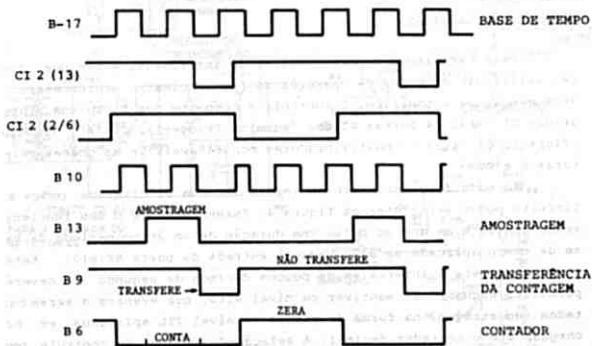


Figura 4 - FORMAS DE ONDA EM PONTOS ESPECÍFICOS DO CIRCUITO

contadores, dependendo portanto do estado de saída do "Flip-Flop", que muda conforme o pulso recebido por ocasião do acionamento manual ou automático, seja de disparo ou de interrupção.

### Base de Tempo

Gera frequências de 1000, 100, 10 e 1 Hz selecionáveis através da chave seletora A. As frequências são obtidas por divisões sucessivas, a partir da frequência 1,024 MHz, controlada por cristal. O CI 4060 propicia a oscilação do cristal e 10 divisões sucessivas por 2, que nos permitem obter 1000 Hz. As outras frequências são geradas por 3 divisões sucessivas por 10 usando-se os contadores decimais CI 7490.

O transistor BC 238 foi utilizado na saída do CI 4060 para diminuir as exigências de corrente sobre o mesmo, uma vez que se trata de um circuito integrado da linha CMOS acionando outro da linha TTL.

Nas medidas de frequência deve-se usar a base de tempo conveniente ao número de dígitos do instrumento. Deve-se lembrar que os erros cometidos serão mais significativos conforme seu ciclo de tempo ou período diminua, devido aos atrasos de acionamento ocorridos nas portas e que são pequenos (poucas dezenas de nano-segundos) para a maioria das aplicações. Nos experimentos em ensino de Mecânica as frequências são da ordem de algumas dezenas de hertz e a base de tempo de 1,0 Hz deve ser utilizada. Se houver interesse em medidas de frequências de poucos hertz, deve-se incluir outro divisor decimal obtendo-se uma base de tempo com 0,1 Hz ou 10 segundos de período.

### Circuito Contador Decimal

É composto de 4 dígitos onde os mostradores (7 segmentos) são do tipo FND 560, PD 560 ou equivalentes. Os circuitos integrados CI 4511 servem com excitadores e decodificadores de BCD para 7 segmentos, além de contar com memória e os CI 7490 como contadores decimais, cuja saída é BCD.

Os níveis de sinal que controlam a transferência e zeragem do circuito podem ser vistos na figura 4 (B9 e B6). O capacitor de 0,22



$\mu$ F e resistor de 22 $\Omega$  foram usados para introduzir um atraso na zera-  
gem dos CIs 7490(TTL) considerando a lentidão dos CIs 4511(CMOS) em  
desconectar-se da saída dos CIs 7490, isto para o correto funciona-  
mento no modo de frequência.

#### Acionamento Manual e Automático

Como já dissemos anteriormente, no modo cronômetro, a contagem  
depende do estado do "Flip-Flop" da direita (CI2). A sua mudança de  
estado ocorre na transição de descida de um pulso aplicado em B11,  
pulso este que pode provir do acionamento manual ou automático.

O acionamento manual é obtido pelo acionamento da chave D, e  
as 2 portas NE do CI4 (7400) tem por função eliminar ruído de chave-  
amento, produzindo-se ao pressionar e liberar a chave um único pulso  
na saída (C3) da porta direita.

O acionamento automático depende de pulsos produzidos no emi-  
sor do transistor BC 239 ao se bloquear o feixe de luz que incide so-  
bre o fotodiodo.

Considerando-se o interesse para reprodução do instrumento, ou  
tras observações importantes devem ser feitas, visando facilitar e ag-  
segurar o bom funcionamento do mesmo, as quais seguem abaixo.

1. Na elaboração das placas de circuito impresso, os componentes de  
diferentes estágios não devem ser misturados entre si, procurando-  
se o agrupamento por suas respectivas funções modulares.
2. As disposições dos diferentes módulos devem propiciar ligações cur-  
tas entre si, sendo que a chave B e C deverão estar próximas da  
função de controle e a chave C próxima da base de tempo.
3. A localização física dos capacitores de poliester deverá ser pró-  
xima dos circuitos integrados, tal qual mostrado no circuito elé-  
trônico para evitar captação de ruído, seguido de falsos aciona-  
mentos.
4. O cristal de 1,024 MHz poderá ser obtido por encomenda das firmas  
XTal do Brasil ou Rádio Cristal do Brasil.

#### Um Exemplo: Queda Livre

Um corpo em queda livre na vertical, embora seja um exemplo  
muito utilizado em mecânica, apresenta dificuldades para ser realiza-  
do experimentalmente, devido às cronometragens de tempo, da ordem de

frações de segundo. Este se constitui num exemplo típico para utilização do cronômetro automático.

A situação que se propõe a seguir, permite determinar a aceleração local da gravidade e ao mesmo tempo testar a equação do movimento com aceleração constante.

Embora a cronometragem seja automática, algumas considerações quanto ao procedimento experimental devem ser feitas de modo a se melhorar a precisão das medidas.

Analisemos primeiramente a ordem de grandeza da força de atrito viscoso devida à resistência do ar. Considerando-se que o corpo se move no ar de modo a provocar um fluxo turbulento podemos descrever a força de atrito  $F_A$  segundo a expressão empírica (1).

$$F_A = \frac{\rho A \delta v^2}{2} = bv^2 \quad (1)$$

onde:

$\rho$  - Densidade do fluido (ar)

$A$  - Área da seção transversal que o corpo apresenta ao fluido

$\delta$  - Fator que depende da forma do corpo

$v$  - Velocidade com que o corpo se desloca no fluido

A velocidade do corpo é dada por (2):

$$v = -\sqrt{\frac{2mg}{m}} \operatorname{tgh}\left(\sqrt{\frac{bg}{m}} t\right) \quad (2)$$

sendo  $m$  a massa do corpo,  $g$  a aceleração da gravidade e  $t$  o tempo de queda a partir da condição de repouso ( $v=0$ ).

A força média ( $\bar{F}_A$ ) devido ao atrito será então

$$\bar{F}_A = \frac{1}{t} \int_0^t bv^2 dt = mg \left(1 - \frac{\operatorname{tgh}\left(\sqrt{\frac{bg}{m}} t\right)}{\sqrt{\frac{bg}{m}} t}\right) \quad (3)$$

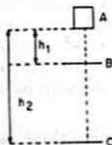
Considerando-se as equações 1 e 3 e que  $\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$ ,  $A = 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ,  $\delta = 1,2$  (corpo com forma cilíndrica),  $t = 0,55 \text{ s}$  (tempo de queda a partir do repouso para uma altura  $h = 1,5 \text{ m}$ ) e  $m = 0,2 \text{ kg}$ , temos

$$\bar{F}_A = 1,5 \times 10^{-3} \text{ mg}$$

Portanto com os valores acima e procurando evitar massas muito menores do que a utilizada, é possível desprezar a influência da resistência do ar uma vez que os erros relativos introduzidos estão dentro da imprecisão das medidas.

O experimento consiste em liberar o corpo cortando-se o seu fio de suspensão com uma tesoura, tendo-se o cuidado de evitar impulsos transversais à trajetória ou ainda liberando-se um corpo de ferro através de um eletromagneto.

O corpo (A) é solto de uma distância  $h_1$  e  $h_2$  de dois dispositivos detetores de posição (B e C) dispostos de acordo com o esquema a seguir:



O intervalo de tempo  $\Delta t$  é medido a partir do momento em que a extremidade do corpo aciona o primeiro detector disparando o cronômetro automático e desligando-o ao passar pelo segundo detector.

Outra consideração a ser feita se refere ao valor da altura  $h_1$  e sua relação com  $h_2$ .

Deve-se evitar situações em que  $h_1=0$  pois um corpo em queda livre a partir do repouso leva cerca de 14 ms para percorrer o primeiro milímetro da trajetória e certamente comprometeria a precisão da medida. Um valor  $h_1$  comparável a  $h_2$  resultaria em uma medida de intervalos de tempo relativamente curtos, também comprometendo a precisão das medidas.

Um valor de  $h_1$  da ordem de 5 cm resulta em velocidade da ordem de 1 m/s no momento em que se inicia a cronometragem ou seja, 1 mm por cada milissegundo, garantindo a precisão das medidas.

Utilizando as equações de cinemática, sabemos que:

$$h_1 = \frac{1}{2} g t_1^2 \quad (4)$$

$$h_2 = \frac{1}{2}g(t_1 + \Delta t)^2 = \frac{1}{2}gt_1^2 + gt_1\Delta t + \frac{1}{2}g\Delta t^2$$

Portanto o espaço percorrido pelo corpo no intervalo de tempo  $t$  é

$$h_2 - h_1 = gt_1\Delta t + \frac{1}{2}g\Delta t^2 = \Delta h \quad (5)$$

A velocidade média do corpo neste intervalo é

$$\bar{v} = \frac{\Delta h}{\Delta t} = gt_1 + \frac{1}{2}g\Delta t \quad (6)$$

Substituindo nesta expressão o valor de  $t_1$  obtido em (4), vem:

$$\bar{v} = \sqrt{2h_1g} + \frac{1}{2}g\Delta t \quad (7)$$

Obtemos a equação de uma reta ( $\bar{v} \times \Delta t$ ) onde podemos calcular  $g$  a partir do coeficiente angular.

## RESULTADOS

A tabela I fornece os resultados experimentais mantendo-se fixo  $h_1 = 5,5$  cm, variando-se  $h_2$  e medindo-se o  $\Delta t$  correspondente, lançando-se na tabela o valor médio obtido para 5 repetições.

A figura 5 mostra a melhor reta ( $\bar{v} \times \Delta t$ ) obtida dos pontos experimentais. Através de uma regressão linear<sup>(3)</sup> encontramos a equação que melhor representa esta reta.

$$\bar{v} = (1,028 \pm 0,004) + (4,896 \pm 0,014)\Delta t \quad (S1)$$

Comparando-se com a equação (7) temos:

$$\frac{1}{2}g = (4,896 \pm 0,014)\text{m/s}^2 \quad \text{ou seja}$$

$$g = (9,79 \pm 0,03)\text{m/s}^2$$

$$\sqrt{2h_1g} = (1,028 \pm 0,004)\text{m/s} \quad h_1 = (0,054 \pm 0,001)\text{m}$$

Os resultados apresentam uma concordância excelente, uma vez que o valor de  $g$  esperado para a região de Ribeirão Preto (20° de latitude) seria de  $9,78 \text{ m/s}^2$ (4,5) e o valor de  $h_1$  utilizado foi de  $0,055 \text{ m}$ .

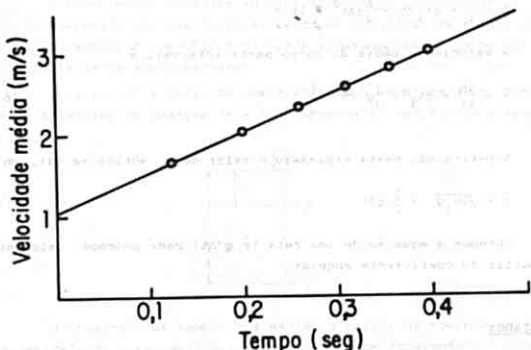


Figura 5 - VELOCIDADE MÉDIA AO LONGO DO TEMPO PARA UM CORPO EM QUEDA LIVRE.

#### REFERÊNCIAS

- (1) EISEBERG, R.M. e LERNER, L.S., Física - Fundamentos e Aplicações, vol.1, cap.4, Mac-Graw-Hill, São Paulo (1982).
- (2) SYMON, K.R., Mechanics, 2<sup>nd</sup> ed., Addison-Wesley, Massachusetts (1965).
- (3) WALOPE, R.F. and MYERS, R.H., Probability and Statistics for Engineers and Scientists, Macmillan, N.York (1972).
- (4) Europhysics News, Bulletin of the European Physical Society, Vol.18, nº 5, (May 1987).
- (5) Handbook of Chemistry and Physics, 56<sup>th</sup> ed., F-195 (1975-1976).