

Ondas estacionárias em cordas e determinação da densidade linear de um fio

(Stationary waves on strings and determination of linear density of a string)

Marisa Almeida Cavalcante¹, Renata Peçanha², Anderson de Castro Teixeira³

¹Grupo de Pesquisa em Ensino de Física, Departamento de Física,
Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

²Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

³Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

Recebido em 4/11/2012; Aceito em 3/2/2013; Publicado em 9/9/2013

Este experimento explora e analisa os recursos gratuitos disponíveis on-line que podem ser utilizados no ensino e aprendizagem de Física. O experimento consiste em utilizar a saída de áudio de um computador para variar a frequência em uma das extremidades de um fio utilizando o *software* SweepGen, disponível gratuitamente na internet. Este trabalho apresenta dois métodos distintos para a determinação da velocidade de propagação da onda na corda bem como a sua dependência com a tração do fio: análise de vídeo com alta taxa de aquisição através do *Tracker* e uso de um foto-transistor conectado diretamente à entrada de microfone de um PC. Os resultados obtidos são convergentes indicando a eficácia dos métodos desenvolvidos e permitem, com custo extremamente reduzido, a realização de experimentos em ondulatórias e particularmente a compreensão do fenômeno de ressonância, tão presente no nosso dia a dia.

Palavras-chave: ondas estacionárias, ressonância, novas tecnologias no ensino, aquisição de dados.

This experiment explores and analyzes the free resources available online that can be used in teaching and learning physics. The experiment consists of using the audio output from a computer to vary the frequency in one end of a string using SweepGen *software*, available free online. This paper presents two different methods for determining the velocity of wave propagation in the string and its dependence on the traction of the cord: analysis of video with high acquisition rate through the use of *Tracker* and a phototransistor connected directly to the microphone input of a PC. The results obtained are convergent indicating the effectiveness of the methods developed and extremely low cost to allow performing experiments on wave and an understanding of the phenomenon of resonance, so present in our daily life.

Keywords: stationary waves, resonance, new technologies in education, acquisition of data.

1. Introdução

Este trabalho é resultado de dois outros já produzidos e publicados que visam complementar e confirmar a importância do estudo de ondulatória. No primeiro: “Ondulatória e acústica através de experimentos assistidos por computador” [1], foram apresentados recursos experimentais para a compreensão de tópicos de ondulatória e acústica. Neste trabalho os autores apresentam um kit de baixo custo que permite o estudo de ondas estacionárias em cordas.

No segundo trabalho: “Aquisição de dados via PC como método investigativo no ensino de física” [2], os autores mostram a importância das diferentes ferramentas disponíveis gratuitamente na internet para a análise dos diferentes harmônicos, tais como o uso do

software de análise de vídeo *Tracker* [3].

A partir da análise e coleta dos dados obtidos a partir de vídeos produzidos com taxa de aquisição de 300 frames por segundos os autores determinaram a densidade linear de um fio considerado inextensível. Com taxas de aquisição 10 vezes maior do que as obtidas em câmeras convencionais, foi possível constatar que a vibração da corda ocorria em uma frequência igual à metade da frequência fixada no gerador de áudio do PC. Com isso foi possível compreender a grande discrepância existente entre o valor esperado para a densidade linear do fio e o valor obtido experimentalmente, quando na utilização do kit desenvolvido por Cavalcante e Tavolaro [1]. Vale ressaltar que o posicionamento do alto-falante nesta montagem é atípico. Em lugar de

¹E-mail: marisac@puccsp.br.

possibilitar a oscilação da corda no mesmo eixo de vibração do alto-falante (Fig. 1), como nas montagens convencionais, estas vibrações ocorrem de modo ortogonal (Fig. 2).

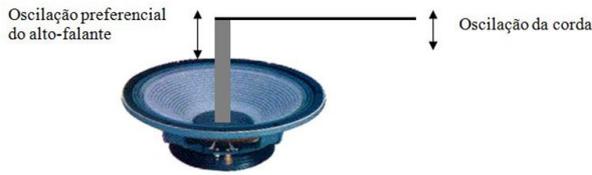


Figura 1 - Montagens convencionais para ondas estacionárias em cordas.

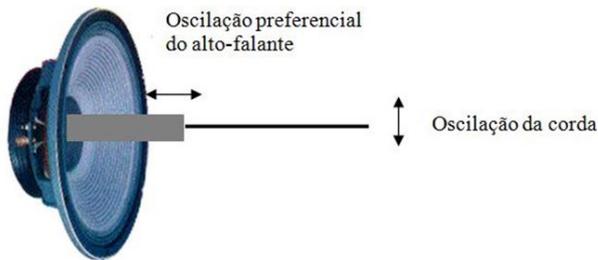


Figura 2 - Montagem do kit didático Cavalcante e Tavolaro [1].

Dada, portanto, a importância do assunto bem como os resultados apresentados no segundo trabalho, desenvolvemos um novo método para a determinação da frequência de oscilação da corda em diferentes harmônicos e com diferentes trações.

Este método consiste em determinar o período de oscilação da corda em regime estacionário através de um photogate conectado diretamente a entrada de microfone de um PC. O sinal proveniente deste fotosensor é analisado a partir do *software* de som *Audacity* que indica os instantes de bloqueio e desbloqueio provocados pela oscilação da corda.

Apresentaremos os resultados obtidos tanto pelas medidas provenientes do *Audacity* quanto a análise de vídeo do *software* *Tracker*, de modo a constatar a eficácia do método proposto.

2. Pulso de ondas

Um pulso de onda é uma perturbação que pode se propagar através do espaço. Suponha que no tempo $t = 0$ o pulso seja descrito por uma função no espaço na forma

$$y = f(x). \quad (1)$$

Se o pulso se propaga para a direita, sem se deformar, com velocidade constante v , então após um tempo t a função que descreve o pulso será dada por

$$y = f(x - vt). \quad (2)$$

Assim, para sabermos se um pulso unidimensional se propaga como uma onda, basta determinarmos se a

forma desse pulso depende no espaço e no tempo no modo apresentado na equação acima (Fig. 3)

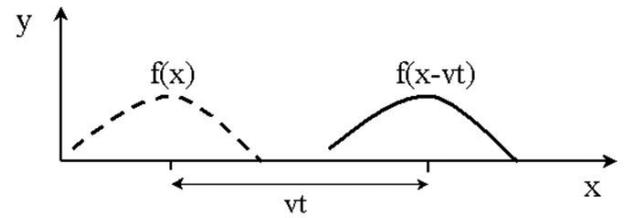


Figura 3 - Propagação de um pulso unidimensional.

Como pode ser observado na Fig. 3, se o deslocamento for perpendicular à direção em que a onda está viajando, a onda é chamada de onda transversa.

Se o deslocamento for paralelo à direção do movimento da onda, ela é chamada de onda longitudinal ou de compressão.

Para ondas mecânicas, o meio não é transportado na propagação da onda. Os átomos individuais e as moléculas oscilam em torno das suas posições de equilíbrio, mas a posição média das partículas não se altera.

À medida que elas interagem com os vizinhos, elas transferem a eles parte da sua energia. Por sua vez, os átomos vizinhos transferem energia aos próximos vizinhos, em sequência. Desta maneira, a energia é transportada através do meio, sem haver transporte de qualquer matéria.

3. Ondas harmônicas

Ondas periódicas são caracterizadas por uma frequência, um comprimento de onda, e pela sua velocidade. A frequência da onda mecânica, f , é a frequência de oscilação dos átomos ou moléculas individuais. O período, $T = 1/f$, é o tempo que leva para um átomo ou molécula particular passar por um ciclo completo de movimento. O comprimento de onda é a distância entre dois átomos, que oscilam em fase, ao longo da direção de propagação.

Uma forma comum para as ondas periódicas é uma função seno ou cosseno, também conhecidas como ondas harmônicas

$$y(x, t) = A \text{sen}[k(x + vt)], \quad (3)$$

onde A é a amplitude da onda, ou seja, o valor máximo que a “perturbação” pode ter; k corresponde ao vetor de onda, de magnitude igual a $2\pi v\lambda$ e v a velocidade de propagação da onda. Esta “perturbação” pode ser, por exemplo, o deslocamento vertical de uma onda se propagando em uma corda, ou seja, dos átomos e moléculas que compõem a corda a partir da posição de equilíbrio.

4. Interferência

Duas ou mais ondas viajam no mesmo meio independentemente e podem passar uma pela outra, causando uma interferência. Este é o chamado “princípio da superposição” [4]

$$y(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t). \tag{4}$$

Em regiões que as ondas podem se sobrepor, aparece somente uma única perturbação, originada da interferência dessas ondas. Se duas ondas com amplitudes iguais se somam em fase, isto é, se os máximos ou os mínimos se encontram, então observamos uma onda com amplitude igual à soma das amplitudes das ondas originais. Teremos, então, uma interferência construtiva (Fig. 4).

Se as duas ondas superpostas estiverem, no entanto, totalmente fora de fase, isto é, se os máximos se encontram com os mínimos, as duas ondas tendem a se cancelar. Teremos, então, uma interferência destrutiva (Fig. 5).

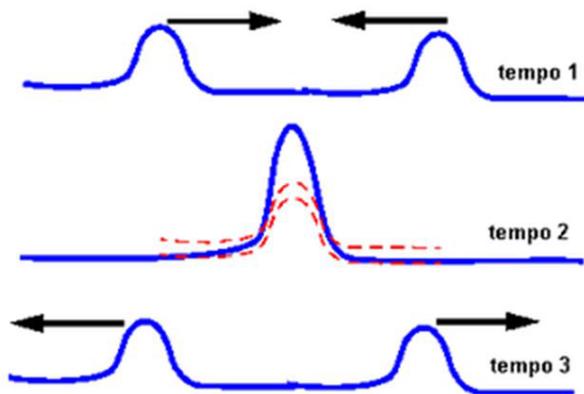


Figura 4 - Interferência construtiva.

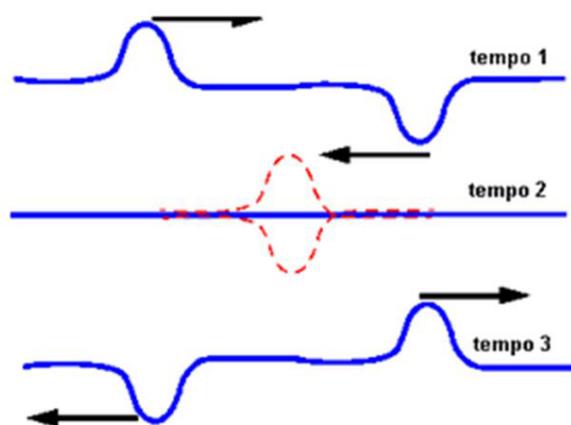


Figura 5 - Interferência destrutiva.

Para ondas harmônicas de mesma amplitude, o princípio da superposição fica, matematicamente, na forma

$$y(x, t) = A_1(x, t) + A_2(x, t), \tag{5}$$

$$y(x, t) = A[\text{sen}(kx - \omega t + \phi) + \text{sen}(kx - \omega t)]. \tag{6}$$

Usando a relação (7) na Eq. (6)

$$\text{sen } a + \text{sen } b = 2\text{sen} \left[\frac{a + b}{2} \right] \cos \left[\frac{a - b}{2} \right], \tag{7}$$

temos que

$$y(x, t) = 2 \left[A \cos \left(\frac{\phi}{2} \right) \right] \left[\text{sen} \left(kx - \omega t + \frac{\phi}{2} \right) \right]. \tag{8}$$

Logo, se a fase $\phi = 0$, a interferência é construtiva. Enquanto que se a fase $\phi = \pi$, a interferência é destrutiva.

Caso as amplitudes sejam diferentes a interferência é parcial.

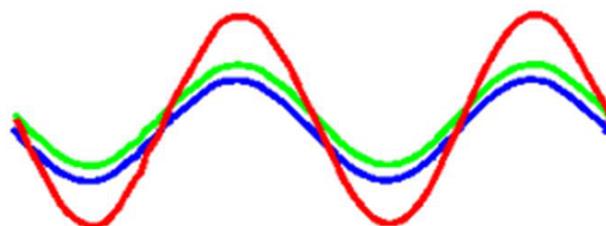


Figura 6 - A linha vermelha indica a interferência construtiva de duas ondas de mesma amplitude e fase $\phi = 0$.

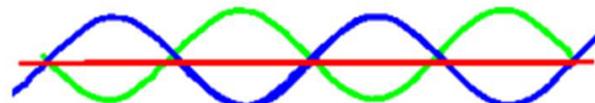


Figura 7 - A linha vermelha indica a interferência destrutiva de duas ondas de mesma amplitude e fase $\phi = \pi$.

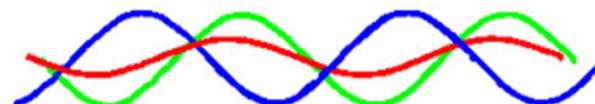


Figura 8 - A linha vermelha indica a interferência parcial de duas ondas de amplitudes diferentes.

5. Ondas estacionárias e harmônicas

Se sobrepusermos ondas de mesma amplitude e comprimento de onda, mas com velocidades opostas, obtemos ondas estacionárias. Isto pode ser visto usando as equações de onda, que neste caso ficam na forma

$$y(x, t) = A\text{sen}(kx + \omega t) + A\text{sen}(kx - \omega t), \tag{9}$$

$$y(x, t) = [2A \sin(kx)] \cos(\omega t). \quad (10)$$

Vemos que esta relação não descreve uma onda que se propaga. Em cada ponto x , há uma vibração determinada pela frequência angular.

Os pontos em que $\sin(kx)$ se anulam são chamados de nós. Estes pontos são obtidos quando $kx = n\pi$, onde $n = 0, 1, 2, \dots$. Logo, obtemos que eles acontecem para

$$x = \frac{(n\lambda)}{2}. \quad (11)$$

Enquanto que os anti-nós acontecem nas regiões intermediárias aos nós (nos máximos dos $\sin(kx)$), ou seja, para

$$x = \frac{[(n + \frac{1}{2})\lambda]}{2}. \quad (12)$$

Para cordas presas em dois pontos fixos, podem ser induzidas ondas estacionárias, onde os pontos fixos são necessariamente nós. Logo, temos que, se a corda possui comprimento l , então os comprimentos de ondas possíveis são obtidos da relação 11, substituindo x por l

$$\lambda = \frac{2l}{n}, \quad (13)$$

onde $n = 1, 2, 3, \dots$. Estes são conhecidos como os comprimentos de ondas dos harmônicos da corda.

As vibrações da corda são transmitidas para as moléculas de ar e, devido à propagação da perturbação, chegam aos nossos ouvidos na forma de som. A frequência desses sons pode ser obtida da relação acima, resultando em

$$f = \frac{v}{\lambda} = \left(\frac{nv}{2l}\right). \quad (14)$$

6. Velocidade da onda em função das propriedades do meio

A velocidade da onda em um meio depende das suas propriedades. Vamos dar um exemplo. Suponha que tenhamos uma corda de massa por unidade de comprimento μ , que esteja esticada por uma força de tensão τ . Se uma onda se propaga na corda, um pequeno elemento da corda, representando a propagação da onda é mostrado na Fig. 9.

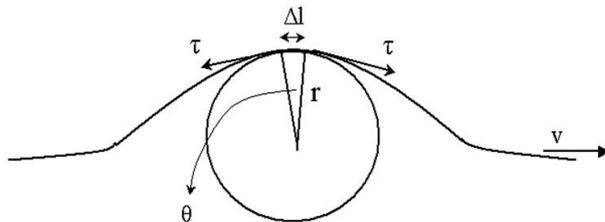


Figura 9 - Pequeno elemento de corda tensionado percorrido por uma onda.

Este elemento, de comprimento Δl , na parte mais elevada da onda, está sujeito à tensão da corda nos dois sentidos de propagação da onda. Podemos desenhar um círculo de raio r , em que r é a amplitude da onda. Este elemento da corda, considerado bem pequeno, está num dos lados de um triângulo cujo ângulo oposto é dado por θ . Instantaneamente, é como se este elemento de corda estivesse se movimentando em uma trajetória circular de raio r , com velocidade v ; a velocidade da corda. Logo, é como ele estivesse sujeito à uma força centrípeta dada por

$$F = \frac{\Delta m v^2}{r} = \frac{\Delta \mu l v^2}{r}. \quad (15)$$

Esta força resulta da componente das tensões no sentido para o centro do círculo. Logo

$$F = 2\tau \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sim \tau\theta, \quad (16)$$

onde usamos o fato do ângulo θ ser muito menor que a unidade, logo, $\sin(\theta/2) \sim \theta/2$. Como $\theta \sim \Delta l/r$, temos que $F \sim (\tau\Delta l)/r$. Igualando estes dois resultados, temos que

$$\frac{\tau\Delta l}{r} = \frac{(\mu\Delta l)v^2}{r}, \quad (17)$$

ou seja

$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}}. \quad (18)$$

A Eq. (18) mostra que a velocidade de uma onda na corda depende da força de tração e da densidade linear. Quanto menor a densidade linear da corda, maior será a velocidade de propagação da onda. Este resultado é válido para qualquer comprimento de onda, ou frequência da onda, para um fio inextensível (mantém suas propriedades para toda sua extensão).

7. Experimento realizado

O experimento consiste em utilizar a saída de áudio de um computador para variar a frequência em uma das extremidades de um fio, de modo a obter uma onda estacionária. Para isso, utilizamos o *software* Audio SweepGen [5], disponível gratuitamente na internet, que passa a ter função de um gerador de sinais (Fig. 1). Na outra extremidade prende-se uma determinada massa tensora apoiada em uma roldana (Fig. 11)

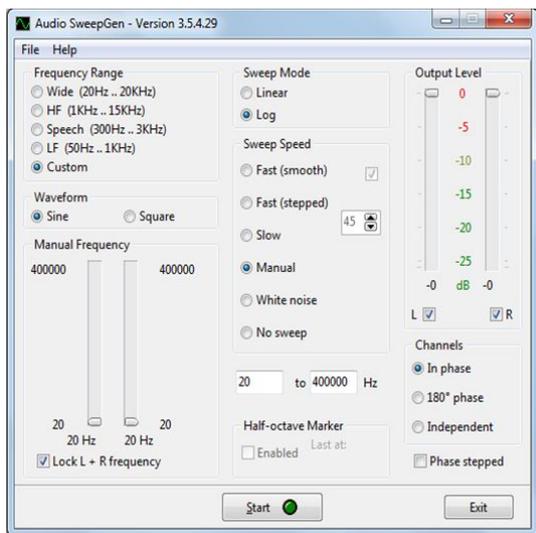


Figura 10 - Interface do software Audio SweepGen.

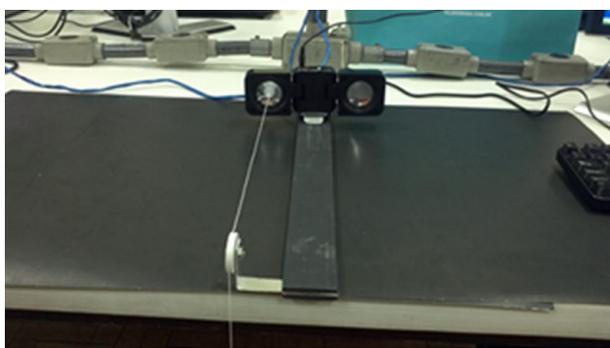


Figura 11 - Montagem utilizada.

Antes de iniciarmos o processo de coleta de dados determinamos previamente as densidades lineares de cada fio utilizando, para a medida de massa, uma balança digital com precisão da ordem de miligramas. Os resultados obtidos, com suas respectivas incertezas estão representados na Tabela 1.

Tabela 1 - Densidades lineares medidas.

Fio	Densidade linear (g/cm)	Incerteza (g/cm)
1	$2,43 \times 10^{-3}$	$5,26 \times 10^{-4}$
2	$4,10 \times 10^{-4}$	$4,37 \times 10^{-5}$

Apresentaremos três procedimentos distintos para a determinação da densidade linear do fio: na primeira etapa, consideramos que a frequência de oscilação da corda é numericamente igual a frequência fixada no gerador de áudio.

Na 2ª etapa determinamos a frequência de oscilação da corda através do software de análise de vídeo *Tracker* reproduzindo o experimento de Querelli e Cavalcante [2] A Fig. 12 mostra a interface do *Tracker*.

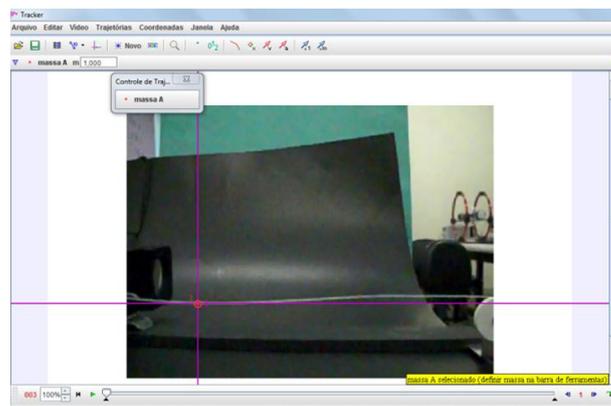


Figura 12 - Interface do software Tracker.

Na 3ª etapa utilizamos o software *Audacity* [6] que permite a visualização do sinal obtido pela interrupção de um feixe de uma ponteira laser incidente em um fototransistor quando da passagem da corda. A Fig. 13 mostra a montagem utilizada em que um feixe de laser é direcionado para um fototransistor conectado diretamente a entrada de microfone do PC e corda interceptando o feixe.

Os fototransistores conectados a entrada de PC e a correspondente análise de dados através do software *Audacity* tem sido aplicado em diferentes experimentos possibilitando medidas de intervalos de tempo com precisões da ordem de $22 \mu s$ [7].

Os instantes de bloqueio e desbloqueio da corda no fotosensor podem ser medidos diretamente na tela do microcomputador através do software de versão freeware *Audacity*.

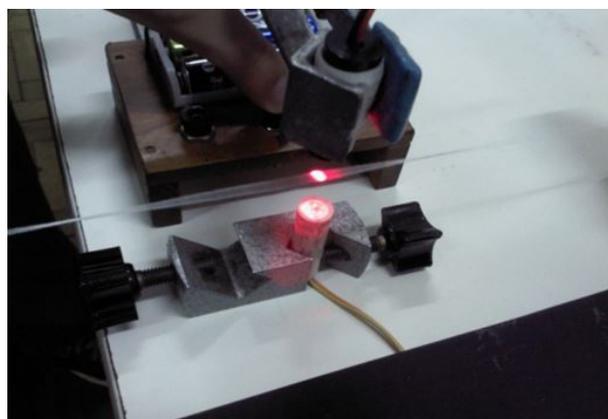


Figura 13 - Montagem utilizando um laser direcionado em um fotosensor conectado a entrada de áudio do PC. Este feixe é interrompido pela passagem decorrente da vibração da corda.

8. Resultados

8.1. Densidade do fio a partir da frequência fixada no gerador de áudio

A Tabela 2 foi obtida considerando que a frequência de vibração da corda é igual à frequência fixada no gerador de áudio.

Tabela 2 - Densidade linear do fio 1 para cada frequência fixada com o gerador de sinal.

L (cm)	Nº de harmônicos	Frequência (Hz)	Velocidade (cm/s)	Densidade linear (g/cm)
28,2	1	64,00	3609,60	4,57E-04
	2	120,00	3384,00	5,20E-04
	3	180,00	3384,00	5,20E-04
32,9	1	53,00	3487,40	4,90E-04
	2	103,00	3388,70	5,19E-04
	3	162,00	3553,20	4,72E-04
38,3	1	45,00	3447,00	5,01E-04
	2	91,00	3485,30	4,90E-04
	3	136,00	3472,53	4,94E-04
Valor médio				4,96E-04
Desvio padrão da média				7,34E-06

Os resultados da densidade linear do fio foram obtidos para diferentes comprimentos do fio tracionados por uma massa igual a 6,079 g.

O valor de velocidade de propagação é obtido pelo produto entre a frequência de cada harmônico e comprimento de onda correspondente.

Observa-se que o valor de densidade linear do fio 1 é cerca de quatro vezes menor do que o valor previamente determinado (Tabela 1).

8.2. Determinação da frequência de oscilação da corda através da análise de vídeo no Tracker

Para esta 2ª etapa, procuramos reproduzir o método de Querelli e Cavalcante [2], em que um vídeo com taxa de aquisição de 300 quadros/s possibilita determinar a frequência de vibração da corda na condição de ressonância. Segundo os autores a oscilação da corda ocorria numa frequência igual à metade do valor fixado no gerador de áudio.

Esta constatação possibilita compreender os resultados obtidos no item 8.1, uma vez que de acordo com a Eq. (18) teremos que a densidade linear do fio é dada por

$$\mu = \frac{\tau}{v^2}, \quad (19)$$

com $v = \lambda F$, sendo λ comprimento de onda e F a frequência de oscilação da corda no harmônico.

Se $F_G = 2F$ onde F_G corresponde à frequência de oscilação fixada no gerador de áudio, fica fácil perceber que a densidade linear obtida no item 8.1 é pelo menos 4 vezes menor do que o valor supostamente esperado.

Na Fig. 14 temos o gráfico da amplitude de oscilação em função do tempo, obtido através do Tracker com uma taxa de aquisição de 300 fps. Estes dados foram obtidos para um comprimento $L = 28,20$ cm e tração 4993,1 dinas no 2º harmônico. Observa-se que o melhor ajuste² para o deslocamento vertical da corda conduziu a uma função senoidal com frequência angu-

lar de 329,2 rad/s, quando a frequência no oscilador era igual a 105 Hz.

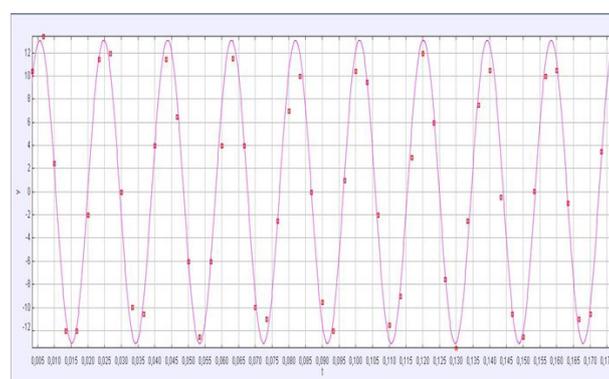


Figura 14 - Gráfico de y vs. t gerado da análise no Tracker com ajuste para função senoidal. Frequência de oscilação da corda obtida 52,4 Hz.

Constata-se, portanto, que a corda oscila com uma frequência igual à metade do valor de frequência fixado no gerador de áudio SweepGen.³

8.3. Determinação da frequência de oscilação da corda através de um fotosensor acoplado diretamente a entrada de microfone

Com o intuito de verificar a relação entre a força tensora e velocidade de propagação na corda, efetuamos medidas de frequência de oscilação a partir do fotosensor para o 1º, 2º e 3º harmônicos para cinco valores de massas.

A Fig. 15 mostra o sinal observado no *software Audacity*. Cada passagem da corda pelo fotosensor gera um sinal, de tal modo que o período de oscilação é obtido com o intervalo de tempo entre o 1º e o 3º bloqueio como indica a Fig. 15.

²O *software Tracker* permite efetuar ou ajustar as curvas manualmente ou automaticamente.

³Disponibilizamos para download os arquivos de vídeo e os arquivos Tracker na Ref. [8].

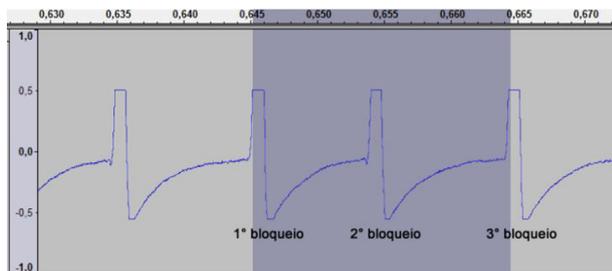


Figura 15 - Exemplo de sinal obtido para determinadas condições.

As Tabelas 3 e 4 mostram os dados obtidos para os fios 1 e 2, com diferentes massas tensoras.

Também efetuamos a determinação dos valores de densidade linear a partir do gráfico de força de tração no fio versus o quadrado da velocidade.

Tal procedimento é aconselhável, pois permite verificar graficamente a validade da Eq. (18), através do coeficiente de correlação linear.

Os gráficos obtidos para os fios 1 e 2 estão representados nas Figs. 16 e 17.

Tabela 3 - Medidas para o fio 1.

$L = 41,80$ cm	Nº de harmônico	Frequência (Hz)	Velocidade (cm/s)	Densidade linear (g/cm)
M1 6,495 g	2	41,00	1713,80	2,50E-03
	3	61,50	1713,80	2,50E-03
M2 7,935 g	2	44,50	1860,10	2,53E-03
	3	66,50	1853,13	2,55E-03
M3 9,250 g	2	48,00	2006,40	2,50E-03
	3	71,50	1992,47	2,53E-03
M4 10,670 g	2	51,00	2131,80	2,52E-03
	3	77,50	2159,67	2,45E-03
M5 12,055 g	2	54,50	2278,10	2,47E-03
	3	81,50	2271,13	2,48E-03
Valor médio				2,50E-03
Desvio padrão da média				9,71E-06

Tabela 4 - Medidas para o fio 2.

$L = 42,20$ cm	Nº de harmônico	Frequência (Hz)	Velocidade (cm/s)	Densidade linear (g/cm)
M1 6,452 g	2	47,50	4009,00	3,93E-04
	3	96,00	4051,20	3,85E-04
M2 7,803 g	2	53,00	4473,20	3,82E-04
	3	105,50	4452,10	3,86E-04
M3 9,157 g	2	56,00	4726,40	4,02E-04
	3	115,50	4874,10	3,78E-04
M4 10,507 g	2	61,50	5190,60	3,82E-04
	3	122,00	5148,40	3,88E-04
M5 12,424 g	2	66,00	5570,40	3,92E-04
	3	131,50	5549,30	3,95E-04
Valor médio				3,88E-04
Desvio padrão da média				2,30E-06

Podemos verificar a partir da Tabela 5 a compatibilidade dos resultados quando comparados com os valores da densidade linear do fio da Tabela 1.

De outro lado os coeficientes de correlação lineares obtidos nos dois casos mostram que podemos aceitar com uma margem de segurança considerável a relação entre tração e a velocidade de propagação da onda em cordas previsto na Eq. (18).

9. Considerações finais

A montagem proposta por Cavalcante e Tavolaro [1] proporciona estudar o processo de ressonância em cordas de modo simples. Nesta montagem um alto-falante é colocado para vibrar a partir da utilização de *software*

disponíveis na web que simula um gerador de sinais a partir da saída de áudio de um PC. Diferentemente da montagem proposta por Mello [9] o alto-falante é disposto em uma posição vertical o que possibilita uma baixa inércia do sistema como um todo, permitindo gerar ondas estacionárias com amplitudes suficientes para uma boa visualização.

Para a montagem de Cavalcante e Tavolaro [1] enquanto a oscilação do alto-falante se dá, por exemplo, no eixo horizontal a corda oscila num eixo perpendicular.

É importante salientar que para este tipo de montagem “todos os harmônicos”, são observados validando a condição de se obter nós nos dois extremos da corda.

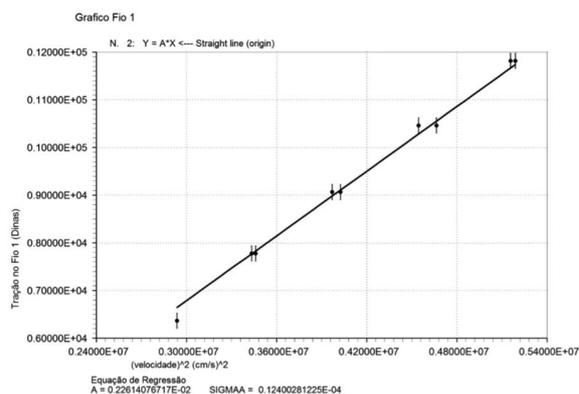


Figura 16 - Gráfico que possibilita determinar o valor da densidade linear do fio 1. Os gráficos foram construídos com o *software* gráfico LabFit disponível em http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/index_p.htm.

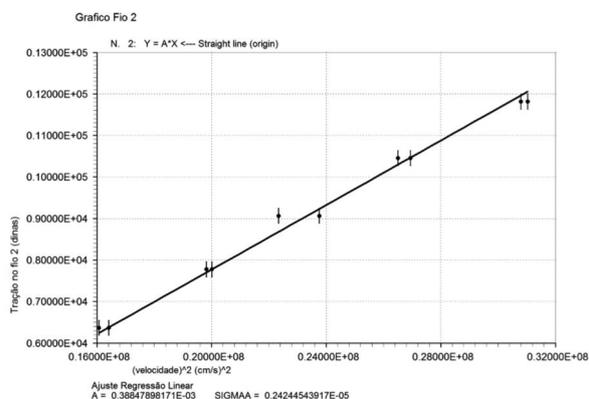


Figura 17 - Gráfico que possibilita determinar o valor da densidade linear do fio 2.

Tabela 5 - Resultados obtidos.

Fio	Densidade linear (g/cm)	Coefficiente de correlação linear (R^2)
1	$(2,26 \pm 0,12) \times 10^{-3}$	0,998668
2	$(3,88 \pm 0,24) \times 10^{-4}$	0,996770

Caso tivéssemos grandes amplitudes de oscilação isso implicaria em um ventre (ou anti-nodo) de oscilação localizado, por exemplo, no ponto de conexão da corda com o pino do alto-falante. Neste caso notaríamos apenas os harmônicos ímpares para cada condição de ressonância; característico deste tipo de oscilação Fendt [10]; o que não foi constatado.

Quando se determina através desta montagem a densidade linear do fio, nota-se uma grande discrepância entre o valor esperado e o valor obtido (pelo menos quatro vezes menor).

Em um trabalho desenvolvido por Querelli e Cavalcante [11] foi possível perceber que a origem desta discrepância residia no fato de que a frequência de oscilação da corda em regime estacionário ser igual à metade do valor da frequência fixada no gerador de áudio conectado ao PC. Tal constatação foi possível mediante a análise de vídeos com taxa de aquisição de 300 fps através do *software* de análise de imagem e movimento *Tracker*; método este reproduzido e apresentado neste artigo.

Neste trabalho, apresentamos ainda um novo método de determinação de densidade linear do fio, em que a frequência de oscilação da corda foi obtida através de um fotosensor conectado diretamente a entrada de microfone de um PC.

Os resultados obtidos possibilitaram contemplar os valores esperados no intervalo de suas respectivas incertezas, atribuindo ao experimento um grau de significância de pelo menos 68,3%.

Portanto, os métodos aqui apresentados confirmam que a frequência fornecida pelo gerador de áudio Sweep-Gen é o dobro da frequência real da onda estacionária, em montagens em que o alto-falante vibra perpendicularmente ao eixo de vibração da corda. Cabe-nos agora buscar compreender do ponto de vista teórico, porque isto ocorre, o que certamente será objeto de estudo nos próximos trabalhos.

Esses dados puderam ser obtidos através de uma metodologia de baixo custo, de fácil reprodução e que gerou resultados eficazes. Sendo, portanto, uma importante ferramenta de ensino.

Além disso, há diversos conceitos abordados no ensino médio que podem ser explorados através desta metodologia.

Referências

- [1] M.A. Cavalcante e C.R.C. Tavoraro, in: IX Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física, 2004, Jaboticatubas, MG, <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epf/ix/atas/posteres/po51-39.pdf>, acesso em 30/6/2012.
- [2] G.E. Querelli e M.A. Cavalcante, in: IV Encontro Estadual de Ensino de Física - RS, Porto Alegre, 2011.
- [3] *Tracker* disponível para download em <http://www.cabrillo.edu/~dbrown/Tracker/>.
- [4] C.A. Bertulani, sítio com conceitos sobre movimento ondulatório: <http://www.if.ufrj.br/teaching/fis2/ondas1/ondulatorio.html>, acesso em 30/6/2012.
- [5] Audio SweepGen disponível para download em <http://www.satsignal.eu/software/audio.html>.
- [6] *Audacity*, versão 1.2.6, disponível para download em <http://xviiisnefnovastecnologias.blogspot.com.br/2009/01/software-de-analise-sonora.html>.
- [7] M.A. Cavalcante, A. Bonizzia e L.C.P. Gomes, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **30**, 2501, 2008.
- [8] Arquivos *Tracker* e vídeos com taxa de 300 fps, disponíveis em <http://sdrv.ms/LHWFQ6>.
- [9] G.I. Mello, *Física na Escola* **8**(2), 31 (2007).
- [10] Fendt-Walter simulador disponível em http://www.walter-fendt.de/ph14br/stlwaves_{_}br.htm, acesso em 3/2/2013.
- [11] G. Querelli, relatório final de Bolsa CNPq iniciação Científica (2011), disponível em <http://migre.me/9HTm1>, acesso em 30/6/2012.