



## **Relatório Final F609 - Tópicos de Ensino de Física**

### **Adaptação do Oscilador Harmônico com um Feixe de Luz (Laser)**



**Aluno: Kenji Suzuki Ynagaki**

RA 081855

E-mail: syoran arroba gmail ponto com

**Orientador: Prof. Antonio Riul Jr**

E-mail: ariuljr arroba gmail ponto com

Coordenador: Professor José Joaquin Lunazzi

Campinas, 01 de Dezembro de 2014

## Introdução

Um movimento é periódico quando um corpo sai e retorna regularmente a um mesmo ponto. Em nosso experimento estudaremos um caso especial do movimento periódico executado em um sistema mecânico (movimento harmônico simples). O presente trabalho busca propiciar de uma maneira simples, a partir de uma adaptação de outro experimento com oscilador harmônico, a visualização do acoplamento existente entre movimentos periódicos e oscilações a estudantes de ensino médio. Entre estes, mais especificamente para os de segundo e terceiro ano, visto que eles já devem ter noções das Leis de Newton, lei de Hooke, transformação de energia e ondulatória. O experimento também tem como objetivo fazer os alunos discutirem a influência causada pela inércia e pelos atritos na execução do experimento, tal como o comportamento da mola durante a oscilação.

A Figura 1 a seguir ilustra o experimento que foi tomado como base:



Figura 1 - Oscilador Harmônico com Molas e Caneta Piloto

## Materiais Utilizados

- Apontador laser (fonte de luz) (Figura 2)
- Blocos de Madeira (Figura 13)
- Esquadro (Figura 14)
- Ganchos (Figura 8)
- Fio de nylon 0.3 mm (linha de anzol) (Figura 9)
- Fitas adesivas (crepe e isolante) (Figura 11)
- palitos de madeira (hashi japonês) (Figura 6)
- Lixa (Figura 15)
- Lubrificante de uso geral em spray (Figura 7)
- Martelo (Figura 16)
- Molas maleáveis de ferro (Figura 4)
- Morsa Industrial (Figura 17)
- Parafusos (Figura 8)
- Peso cilíndrico metálico (Figura 12)
- Prendedor de uso doméstico (Figura 3)
- Serra (Figura 18)
- Suporte móvel de madeira (Figura 10)
- Tesoura (Figura 5)



Figura 2 – Apontador Laser



Figura 3 – Prendedor



Figura 4 - Mola maleável metálica



Figura 5 - Tesoura sem pontas



Figura 6 - Palitos de madeira



Figura 7 - Lubrificante



Figura 8 - Parafusos e Ganchos



Figura 9 - Fio de nylon



Figura 10 - Suporte móvel de madeira



Figura 11 - Fita Crepe e Fita Isolante



Figura 12 - Peso cilíndrico metálico



Figura 13 - Blocos de madeira

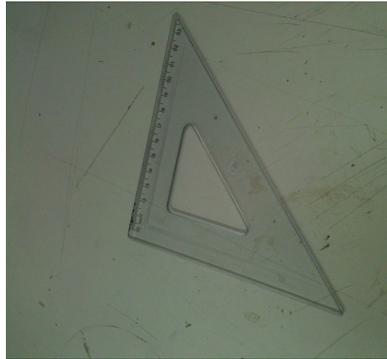


Figura 14 - Esquadro



Figura 15 - Lixa



Figura 16 - Martelo



Figura 17 - Morsa industrial



Figura 18 - Serra

## Funcionamento e montagem experimental

O projeto consiste na união de dois movimentos, um periódico, que seria a oscilação vertical da fonte luminosa acoplada entre duas molas, e um horizontal, executado manualmente pela mão do operador do experimento (transversalmente em relação ao sentido da oscilação). A junção desses dois movimentos tem como função a reprodução de um movimento harmônico simples, de representação senoidal.

A montagem é composta por duas molas acopladas ao suporte, que chamaremos de carro, uma na parte superior e outra na parte inferior, com o auxílio de

ganchos. Adicionalmente, a fonte de luz (apontador laser) precisa ficar presa entre as molas, o que fizemos adaptando uma estrutura com peso cilíndrico metálico, palitos de madeira japoneses (*hashis*), fitas adesivas, ganchos e pregos (Figura 19). Utilizando um prendedor conseguimos deixar o apontador laser ativo, que reproduzirá o movimento periódico com o auxílio do carro móvel que o suporta.



Figura 19 - Montagem parcial da estrutura de suporte da fonte de luz (apontador laser) composta por dois ganchos presos junto a um peso cilíndrico metálico no centro, e tendo *hashis* como base e dois ganchos em cada ponta, tudo unido por fita adesiva.

O executor deve mover o suporte com rodas horizontalmente, no sentido transversal ao plano da oscilação com o laser. Se o movimento for bem executado, devemos conseguir visualizar, mesmo que por um breve intervalo de tempo, o desenho de uma senóide em um anteparo. Este anteparo pode ser qualquer superfície plana, como uma parede, de preferência não vermelha, dado que é a cor da nossa fonte de luz.

Ao iniciarmos o movimento do carro, a estrutura que comporta a fonte de luz tende a manter sua posição por inércia, o que faz com que a mola não oscile perfeitamente na vertical se estiver em movimento. Para evitar esse efeito de rotação utilizamos fios de nylon como guias, presos por ganchos na madeira na estrutura de madeira. Alguns blocos foram utilizados como separadores de fio (vide Figura 13), deixando uma distância ideal para não causar atrito entre os fios e a estrutura de *hashi*, e ao mesmo não dar liberdade de rotação ao iniciarmos o movimento. Os blocos foram cortados a partir de um pedaço qualquer de madeira, presa em uma morsa industrial (Figura 17), cortados com uma serra (Figura 18) e lixados para adquirir a largura desejada com uma lixa (Figura 15). Os blocos foram encapados (Figura 13) e presos com fitas adesivas para não danificar o fio de nylon.

## Análise Teórica

Imaginemos um corpo de massa  $m$  preso à ponta de uma mola, com o bloco livre para se mover sobre uma superfície horizontal, sem atrito. Quando a mola não está esticada nem comprimida, o corpo está em repouso na posição chamada posição de equilíbrio do sistema, que identificamos como  $x = 0$ . Sabemos que tal sistema oscila para a frente e para trás se tirado de sua posição de equilíbrio.

A força restauradora, ou seja, a força direcionada para a posição de equilíbrio, pode ser representado pela Lei de Hooke. Essa força é sempre na direção oposta ao do deslocamento do corpo, o que justifica o uso do sinal negativo na sua representação escalar. Para um corpo que foi deslocado para uma posição  $x$  a partir da sua posição de equilíbrio:

$$F_{el} = -k \cdot x \quad (1)$$

Quando deslocado de seu ponto de equilíbrio e liberado, o corpo pode ser interpretado como uma partícula sob a ação de uma força resultante, ou seja, sofre uma aceleração. Aplicando a Segunda Lei de Newton ao movimento do bloco, isolando-se a variável aceleração, obtemos uma relação para a aceleração do corpo, como pode ser visto na Equação 5.

$$R = m \cdot a \quad (2)$$

$$F_{el} = m \cdot a \quad (3)$$

$$-k \cdot x = m \cdot a \quad (4)$$

$$a = -k \cdot x / m \quad (5)$$

Utilizando a notação de mecânica clássica:

$$a = dv/dt = d^2x/dt^2 \quad (6)$$

logo

$$d^2x/dt^2 = -k \cdot x / m \quad (7)$$

Substituindo  $k/m$  por  $\omega^2$  para facilitar futuras contas

$$\omega^2 = k/m \quad (8)$$

$$\omega = \sqrt{(k/m)} \quad (9)$$

temos outra representação da aceleração, que pode ser visualizada abaixo na Equação 10

$$d^2x/dt^2 = -\omega^2 x \quad (10)$$

A equação diferencial ordinária (E.D.O.) acima possui raízes complexas, cuja solução geral tem constantes arbitrárias multiplicando funções trigonométricas seno ou cosseno, como representado abaixo:

$$x(t) = A * \cos(\omega t + \varphi) \quad (11)$$

sendo A a amplitude máxima do movimento,  $\omega$  a frequência angular e  $\varphi$  a fase inicial do movimento.

Para provar que a Equação 11 é a solução:

Prova

$$v(t) = dx/dt = d(A * \cos(\omega t + \varphi))/dt = -\omega * A * \sin(\omega t + \varphi) \quad (12)$$

$$a(t) = dv/dt = d(-\omega * A * \sin(\omega t + \varphi)) = -\omega^2 * A * \cos(\omega t + \varphi) \quad (13)$$

mas substituindo (11) em (13) obtemos

$$a(t) = -\omega^2 x \quad (14)$$

Portanto, a solução em (11) foi escolhida corretamente.

Repare que para A,  $\omega$  e  $\varphi$  constantes, a mesma fase que resultaria em aceleração máxima resultaria em velocidade mínima e vice-versa, visto que as funções seno e cosseno tem seus máximos e mínimos em fases diferentes.

A energia potencial elástica em um extremo da elongação da mola vai se transformando em energia cinética, que vai aumentando a rapidez com que o corpo se move até o ponto de equilíbrio. A partir do ponto de equilíbrio essa energia cinética volta a se transformar ao longo do movimento em energia potencial elástica, repetindo esse movimento periodicamente. Se ignorarmos a existência das forças dissipativas, o movimento não cessaria até uma interferência externa ocorrer. Esse fenômeno de transformação de energias sem dissipação de energias retrata o teorema da energia mecânica, em que a energia mecânica total num sistema se mantém constante.

$$(E_{mec})_i = (E_{mec})_f \quad (15)$$

Onde energia mecânica é representado pela Equação 2.1

$$E_{mec} = K + E_{pel} \quad (16)$$

Sendo energia cinética

$$K = m * v^2 / 2 \quad (17)$$

e energia potencial (elástica nesse caso)

$$E_{pe} = k * x^2 / 2 \quad (18)$$

Se a montagem fosse vertical existiria mais um fator a ser considerado, a energia potencial gravitacional, que pode ser calculada por (19)

$$E_{pg} = m * g * h \quad (19)$$

A análise do movimento não se limita à posição, velocidade, aceleração, força e energia. Podemos encontrar a partir delas relações importantes, como por exemplo a partir da frequência angular do corpo, como visto em (20)

$$\omega = 2\pi/T \quad (20)$$

Isolando-se o período

$$T = 2\pi/\omega \quad (21)$$

Mas período também é conhecido por

$$T = 1/f \text{ (onde } f = \text{ frequência do movimento)} \quad (22)$$

Igualando-se (21) e (22), e isolando-se f

$$1/f = 2\pi/\omega \quad (23)$$

$$f = \omega/2\pi \quad (24)$$

reorganizando (24)

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T \quad (25)$$

substituindo a equação (9) nas equações (21) e (24) encontramos

$$T = 2\pi\sqrt{m/k} \quad (26)$$

$$f = 1/T = (1/2\pi)*\sqrt{k/m} \quad (27)$$

encontrando assim outra maneira de calcular período e frequência, mas com as variáveis encontradas em um sistema massa-mola, sendo  $k$  a constante de elasticidade da mola,  $m$  a massa do corpo preso,  $T$  o período em segundos,  $f$  a frequência em ciclos por segundo ou Hertz (Hz),  $\omega$  em radianos por segundo e  $h$  a altura em metros para as equações acima.

## Dificuldades Encontradas

As primeiras dificuldades surgiram em relação ao movimento da fonte laser e posterior design de como faríamos o suporte que a movimentasse (dimensões que facilitassem tanto a movimentação quanto o acoplamento com as molas da montagem experimental já existente no Laboratório de Instrumentação para o Ensino de Física). Importante ressaltar a dificuldade de acoplamento das molas, e de obtenção das mesmas, o que nos levou à escolha de usar o conjunto já existente.

Após conseguirmos montar uma estrutura para ligar as molas e o apontador laser, vide Figura 19, pudemos concluir a oscilação periódica com sucesso no carro estático, ou seja, sem andar. A partir desse ponto, tentamos introduzir o movimento do carro, o que fez surgir novas dificuldades. Ao acelerar o carrinho, fazendo com que este parta do repouso e ganhe certa velocidade, a estrutura que suporta o apontador laser tende a ficar “para trás” por inércia, mas como está presa entre duas molas maleáveis, estas produzem um efeito elástico na direção horizontal, causando rotação. Essa rotação não permite com que o sinal desejado seja formado, o que nos levou a pensar em uma contra-medida.

A solução escolhida foi o uso de linhas guias, que seriam presas verticalmente em pontos estratégicos do suporte e impediriam o movimento de rotação da estrutura feita de *hashi* e peso metálico. A Figura 20 a seguir ilustra algumas linhas guias montadas no carro.



Figura 20 - Linhas guias em montagem parcial

O uso de linhas foi uma solução, mas, ao mesmo tempo, causou mais dificuldades a serem vencidas para o sucesso do experimento. A ausência de furadeira de fácil acesso foi um dos maiores agravantes. As linhas foram presas com o uso de fitas adesivas em ganchos e parafusos a princípio, o que não foi difícil. Porém a existência delas não garantia o movimento desejado em sua plenitude, pois fatores como a tração, distância entre os fios e atrito deixavam o movimento da estrutura do laser ora caótico, ora limitado demais. Ao tracionarmos com vigor para deixar os fios firmes, os parafusos ou ganchos em que as linhas estavam presas se soltavam ou as linhas se aproximavam, buscando a menor distância possível.

Se por um lado tracionamos pouco, as linhas não aparariam o movimento lateral da estrutura portadora do laser, o que nos obriga a tracionar bastante. Se por outro lado tracionamos bastante os ganchos e parafusos não resistiriam à tração sendo presos apenas por fitas adesivas e se descolariam do ponto onde foram fixados.

Para uma maior firmeza utilizamos o martelo (Figura 16), para fixar os ganchos no carro móvel, que daria o furo inicial e manualmente giramos para que o gancho entrasse mais, dando mais estabilidade. Após termos ganchos estáveis poderíamos prender os fios de náilon com maior firmeza, mas devido a nossa montagem surgiria um atrito devido à pequena distância entre os fios e a estrutura tentando oscilar entre eles, o que resultaria num amortecimento do movimento, parando a oscilação muito precocemente. Para este caso, inibimos o problema do atrito entre a estrutura e os fios de náilon com duas outras soluções, o uso de lubrificante (Figura 7), o que resultou em uma melhora significativa na duração da oscilação, e o uso de separadores de madeira (Figura 13) com largura aproximadamente igual ao do *hashi* da estrutura (Figura 19), que colocados estrategicamente entre os fios fazem com que a abertura entre os fios seja mais espaçada, reduzindo assim o atrito com a estrutura com o laser.

## Resultados Obtidos

Até o presente momento foram obtidos resultados satisfatórios, tanto no sentido da montagem como no da visualização da onda senoidal desejada. Vale ressaltar que não há registro da onda de forma permanente, pois não utilizamos tinta de qualquer espécie, apenas um feixe de luz para delinear o formato desejado, que ao atingir um anteparo, como por exemplo uma parede, não deixa marcas.

A Figura 21 a seguir ilustra a montagem final:



Figura 21 - Suporte formado pelo carro e a fonte de luz em sua própria estrutura acoplada ao suporte por duas molas.

## Palavras-Chaves

Para as pesquisas na internet foram utilizadas basicamente várias combinações entre as palavras:

- MHS
- Movimento Harmônico Simples
- Experimento

em várias línguas, tanto no site do Google quanto no do Youtube.

## **Preferência de Horário**

No dia 3 de Dezembro de 2014, quarta-feira, prefiro o primeiro horário (16-18h).

## **Opinião do Orientador**

O aluno manteve contato ao longo de todo o semestre para execução do trabalho, com periodicidade em conversas e buscas por alternativas frente aos problemas que com o tempo apareciam. Não pude acompanhá-lo na apresentação final por estar em uma conferência no exterior, mas ressalto seu empenho e dedicação para contornar por conta própria alguns problemas que ainda persistiam alguns dias antes de sua apresentação. Todo direcionamento encaminhado para confecção do trabalho escrito apareceu na versão final, e em face de todo empenho aplicado, parabenezo o aluno pelo sucesso no experimento.

## **Comentários do Evento**

Durante o evento de apresentações dos projetos realizado na quarta-feira, dia 3 de Dezembro, o experimento apesar de ter uma apresentação breve, tomou o interesse dos que o vinham ver, tanto antes quanto depois. Havendo uma explicação inicial sobre o fenômeno que deveria ser visualizado e após visualizarem de fato o resultado, uma discussão sobre a execução, melhoras na visualização e frequentemente foi pedido novamente outra exibição do fenômeno. Visitaram tanto professores do instituto de física, tal como alunos de escolas públicas ainda no ensino médio.

## **Comentários Gerais**

O experimento a princípio, por sugestão do professor Lunazzi, seria movimento harmônico por persistência na retina, mas por fatores como frequência de oscilação insuficiente, amplitude do movimento diminuir com o tempo e o observador talvez não balançar a cabeça lateralmente com a rapidez necessária para vislumbrar o efeito, optamos por não seguir por esse caminho.

Também por sugestão do professor Lunazzi, o experimento apresentado no evento poderia ter algumas melhoras significativas, tal como a existência de um aparato para o sinal do laser com o desenho de uma onda senoidal, e a partir desse desse desenho tentar sincronizar o sinal obtido com a curva registrada. O professor também sugeriu um aparato feito de material fosforescente, o qual após ser sensibilizado pela luz do laser vermelha, mostraria seu rastro temporariamente, facilitando sua visualização.

## Referências Bibliográficas

[1] Relatório final de ex-alunos da disciplina disponibilizado pelo Professor Lunazzi [http://webensino.unicamp.br:8080/cursos/diretorio/portfolio\\_114130\\_1\\_4//Andre\\_Vinicius\\_Welder\\_Riul\\_F609\\_RF2.pdf?1415770688](http://webensino.unicamp.br:8080/cursos/diretorio/portfolio_114130_1_4//Andre_Vinicius_Welder_Riul_F609_RF2.pdf?1415770688)

[2] [https://www.youtube.com/watch?v=P-Umre5Np\\_0](https://www.youtube.com/watch?v=P-Umre5Np_0) (Experimento realizado no MIT de MHS)

[3]

[http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F809/F609\\_2013\\_sem2/Clarisac-Dirceu\\_RF01.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F609_2013_sem2/Clarisac-Dirceu_RF01.pdf)

[4] Jewett W. John, Serway A. Raymond. "Física para cientistas e engenheiros - Volume 2: Oscilações, ondas e termodinâmica", 2010.

[5] Thorton T. Stephen, Maryon B. Jerry. "Classical Dynamics of Particles and Systems - Fifth Edition"