Universidade de São Paulo
Instituto de Física de São Carlos

Atividade de Laboratório de Física II à Distância

Osciladores livres, amortecidos e forçados - Ressonância

Roteiro adaptado do livro de prática de Laboratório de Física II do IFSC para uso com videoaulas

(*J. Schneider e E.R. de Azevedo. (compiladores), Laboratório de Física II, Livro de Práticas. Instituto de Física de São Carlos - USP, 2016. Disponível para download em: http://granada.ifsc.usp.br/labApoio/index.php?option=com_content&view=article&id=8&Itemid=13*)

Vídeo aulas relacionadas a esse roteiro estão disponíveis em:

https://www.youtube.com/playlist?list=PLDre2jYH3njjMv8cYlDXmIZCO1qB5h9CU

- Oscilador Harmônico Simples: sistema massa-mola e pêndulos (com coleta de dados)
- Oscilador Harmônico Amortecido: regimes de amortecimento em sistemas massa-mola (com coleta de dados)
- Oscilador Harmônico Forçado: ressonância mecânica (com coleta de dados)
- Oscilador Harmônico Simples: formulação, equação do movimento e sua solução. (neste este vídeo não há coleta de dados, mas uma fundamentação teórica mais profunda do assunto para servir como apoio)

Objetivo

Estudar o comportamento de um oscilador massa-mola vertical no que diz respeito à amplitude e frequência das oscilações, em função da viscosidade do meio (ar e água) e em condições de oscilação livre. Para oscilações forçadas por um agente externo, será estudado o fenômeno da ressonância.

1.1 Fundamentos teóricos

1.1.1 Oscilador harmônico vertical livre

Consideramos, em primeiro lugar, um sistema massa-mola oscilando verticalmente no ar, onde o atrito da massa com o meio é pequeno. Na posição de equilíbrio, a mola fica alongada, de maneira que sua força elástica compense o peso do corpo. Definimos essa posição de equilíbrio como a origem do sistema de coordenadas: $x_{eq} = 0$. Quando a massa é afastada do equilíbrio, numa certa distância x_0, medida com relação à x_{eq}, o sistema responderá como um oscilador harmônico convencional e a posição da massa como função do tempo é descrita por

$$x(t) = x_0 \cos(\omega_0 t)\,, \tag{1}$$

com frequência angular característica $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$, na qual k é a constante elástica da mola e m a massa do corpo suspenso. Essa é a frequência natural de oscilação do sistema. Na equação (1) está assumido que em $t = 0$ se tem $x(0) = x_0$. A amplitude máxima de oscilação x_0 deveria ser constante ao longo do tempo e independente de k ou m. No entanto, sabemos que o atrito no meio não é exatamente nulo e, depois de algum tempo, perceberemos que as amplitudes máximas das oscilações decaem no tempo até o sistema ficar em repouso. Ainda assim, a aproximação de oscilador harmônico é satisfatória no ar, desde que analisemos o movimento durante as primeiras oscilações.

1.1.2 Oscilador harmônico vertical amortecido

Quando o movimento da massa ocorre dentro de um meio viscoso, como a água, o amortecimento das oscilações é mais intenso do que no ar e a aproximação de oscilador harmônico, sem atrito, não está justificada. Para tratar esse problema devemos incluir uma força adicional (a força de atrito viscoso):

$$F_a = -b\,v = -b\frac{dx}{dt} \quad , \tag{2}$$

que é proporcional à velocidade *v* do corpo, mas de sentido oposto. O fator *b* é uma constante que caracteriza o grau de amortecimento. Descrevendo o movimento desde o referencial com origem na posição de equilíbrio, a equação de movimento, que resulta ao aplicar a Lei de Newton, pode ser escrita como:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx - b\frac{dx}{dt} \quad . \tag{3}$$

O termo $-k\,x$ representa a força de restituição da mola. Essa equação é mais complicada do que a equação do oscilador harmônico, devido à presença do termo envolvendo a primeira derivada da posição *x*. A solução desta equação é

$$x(t) = x_0 e^{-\left(\frac{b}{2m}\right)t}\cos(\omega_1 t) \quad , \tag{4}$$

em que x_0 é a amplitude máxima *inicial* (em t=0) e ω_1 é a frequência angular da oscilação, dada por

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{b}{2m}\right)^2} \quad . \tag{5}$$

O termo $\frac{b}{2m}$ é o *fator de amortecimento* e será representado pela letra grega γ. Observe que, pela consistência dimensional da equação (5), a unidade de γ é radiano/segundo. Podemos reescrever a eq.(4) em termos de ω_1 e γ como

$$x(t) = \left[x_0 e^{-\gamma\,t}\right]\cos(\omega_1 t) \tag{6}$$

e, usando a definição da frequência natural ω_0, podemos reescrever a equação (5) como

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} \quad . \tag{7}$$

Podemos notar, pela eq. (6), que a posição da massa oscila harmonicamente com a frequência ω_1, com fator de amplitude dado pelo termo entre colchetes, isto é, o produto de x_0 pela função exponencial decrescente $e^{-\gamma\,t}$. Portanto, as amplitudes extremas da oscilação x_e serão progressivamente menores, com taxa de decréscimo diretamente proporcional a γ. Na figura 3.1 é mostrado o gráfico da função (6), indicando em linha tracejada o perfil da função exponencial. Podemos ver que, se o amortecimento não for muito grande, a massa realiza várias oscilações com período $T_1 = 2\pi/\omega_1$, antes de retornar ao repouso. Quanto maior o valor de γ, mais rápido é o decréscimo das amplitudes das oscilações. Observe que em (7) existe uma condição crítica para o fator de amortecimento, $\gamma_C = \omega_0$. Nessa situação, chamada amortecimento crítico, o sistema não oscila e o retorno ao equilíbrio ocorre exponencialmente. Quando $\gamma > \gamma_C$, os valores de γ determinam maior tempo para o sistema retornar ao equilíbrio. Essa é a situação de amortecimento supercrítico.

Questão: De que forma o efeito do atrito perturba a frequência de oscilação?

Questão: A energia mecânica inicial do oscilador se conserva durante o movimento?

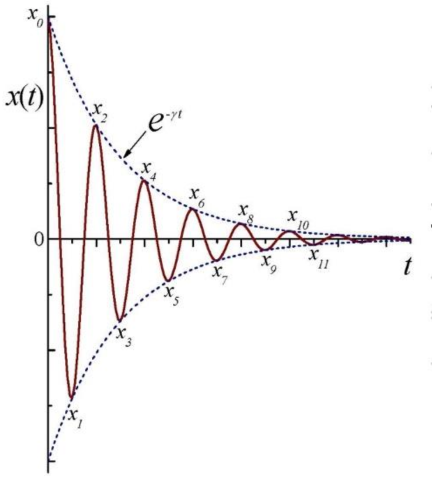
A Física e a Engenharia: ressonância em estruturas

Toda estrutura construída (casa, prédio, ponte, etc.) possui inércia (massa, momento de inércia). Ao mesmo tempo, os materiais que a compõem, apresentam elasticidade, dentro de certos limites, e dissipação da energia mecânica por atrito interno e/ou externo. Portanto, quando levemente afastada do equilíbrio, por um agente externo, a estrutura poderá retornar à sua configuração de equilíbrio realizando oscilações amortecidas. Como todo sistema mecânico elástico, a estrutura terá frequências naturais de oscilação ω_{oi} correspondentes a diferentes *modos de vibração*. Quando a força externa oscila com o tempo, com frequência Ω, por exemplo, devido a um movimento sísmico ou perturbação pelo vento, a estrutura acompanhará essa oscilação com uma amplitude que dependerá de Ω; será grande quando Ω se aproximar de alguma frequência natural ω_{oi} (situação conhecida como condição de ressonância). Eventualmente, isso pode causar o colapso da estrutura. A queda da ponte de Tacoma Narrows é um exemplo clássico desse fenômeno, cujo processo de oscilação ressonante foi iniciado pela ação de vento de intensidade moderada sobre as superfícies planas da estrutura. É importante notar que, na condição de ressonância, as amplitudes de oscilação são grandes, ainda que as forças externas sejam fracas; o importante é que a frequência de oscilação coincida com uma frequência natural do sistema. Uma forma de retirar a energia mecânica da estrutura, quando oscila em ressonância, é colocá-la em contato com outros sistemas que absorvam essa energia e a dissipem. Isso pode ser realizado com amortecedores convencionais com fluido, ou com amortecedores de "massa sintonizada". Esses últimos são mais utilizados por não precisarem de muita manutenção. Trata-se apenas de pêndulos massivos, cuja massa é ajustada para obter uma frequência de oscilação idêntica à frequência de ressonância da estrutura. Muitos arranha-céus e torres de comunicação de grande altura possuem um amortecedor dessa classe no topo. Um dos exemplos mais chamativos é o edifício Taipei 101, que possui um pêndulo esférico central de mais de 700 toneladas, com comprimento de suspensão de 4 andares, para minimizar a amplitude da vibração eólica da estrutura.

1.1.3 Oscilador harmônico vertical forçado

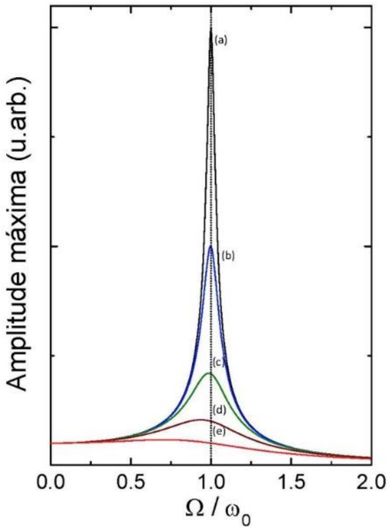
Para manter qualquer sistema físico oscilando em um meio com dissipação, é necessário compensar a perda de energia através de trabalho realizado por um agente externo. No sistema massa-mola, essa condição pode ser atingida através da ação de uma força externa que varie no tempo, de modo que mantenha a amplitude de oscilação constante. Nesse caso, a oscilação é *forçada*.

Figura 0.1- Função de posição x(t) para o oscilador amortecido de acordo com a eq.(6). Linha tracejada: fator de modulação exponencial $e^{-\gamma t}$ das amplitudes máximas de oscilação.



Fonte elaborada pelos compiladores.

Figura 0.2 - Amplitude de oscilação $x_0(\Omega)$ do oscilador amortecido forçado (eq. 11) em função da frequência de excitação Ω da força externa, relativa ao oscilador livre ω_0, para diferentes valores de fator de amortecimento γ: (a) γ = 0,025 ω_0 ; (b) γ = 0,05 ω_0 ; (c) γ = 0,12 ω_0 ; (d) γ = 0,25 ω_0 ; (e) γ = 0,50 ω_0



Fonte elaborada pelos compiladores.

A variação temporal da força externa mais importante de se analisar é a variação harmônica, por exemplo, cossenoidal

$$F_{ext} = F_0 \cos(\Omega\, t) \qquad , \tag{8}$$

na qual Ω é a frequência angular de variação da força externa. A frequência está determinada pelo agente externo ao oscilador, como, por exemplo, a frequência de rotação de um motor. É um parâmetro independente das propriedades do oscilador; não tem qualquer relação com as frequências angulares ω_1 e ω_0 estudadas anteriormente. F_0 é a amplitude máxima da força externa. Levando em consideração essa força adicional, a segunda Lei de Newton, aplicada à massa em suspensão, fornece a seguinte equação diferencial para a posição $x(t)$:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx - b\frac{dx}{dt} + F_0 \cos\Omega\, t \tag{9}$$

A solução dessa equação é dada por:

$$x(t) = \left[x_0(\Omega)\right] \cos(\Omega\, t + \delta) \tag{10}$$

É instrutivo comparar essa solução com as equações (1) e (6), do oscilador livre e do amortecido. A grande semelhança entre essas soluções é o termo cosseno, indicando que sempre temos oscilações harmônicas. No entanto, em (10), a frequência das oscilações é Ω, imposta sobre o sistema pelo do agente externo. Podemos dizer que a massa é forçada a "acompanhar" a oscilação da força externa, independentemente de qual for a frequência natural do oscilador. O parâmetro δ é apenas uma constante de fase que depende de Ω, que não será discutida nesta prática. Uma grande diferença entre (10) e as equações (1) ou (6) é o fator de amplitude da oscilação $x_0(\Omega)$. No oscilador forçado, essa amplitude está imposta pelo agente externo e depende da frequência da força externa da seguinte forma:

$$x_0(\Omega) = \frac{F_0 / m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\gamma^2\Omega^2}} \,. \tag{11}$$

A Física e a Engenharia Elétrica: amortecimento de vibrações em linhas de potência

Os cabos de transmissão elétrica suspensos entre torres são susceptíveis de vibrar pelo efeito do vento. Como veremos na Prática de Ondas Estacionárias, se o comprimento do cabo e a frequência de vibração satisfazem a condição de ressonância, uma onda estacionária será estabelecida no cabo. Isso é prejudicial, pois expõe o cabo a tensões mecânicas indesejadas em certos pontos. Para eliminar essas vibrações, cuja faixa de frequência pode ser estimada, é possível acoplar pêndulos que vibrem com as mesmas frequências, absorvendo, assim, a energia mecânica do cabo de forma ressonante. Esse sistema foi patenteado em 1928, por George Stockbridge, e consiste em duas massas fixadas nos extremos de um cabo curto que se suspende da linha de potência. Regulando o valor das massas, a tensão e o comprimento do cabo de união, é possível ajustar a frequência de oscilação. Esse sistema é passivo, de baixo custo, pouca manutenção e facilmente ajustável.

Amortecedor de Stockbridge

Fonte: STOCKBRIDGE[1]

- Qual seria a vantagem de usar esse tipo de amortecedor em vez de simplesmente colocar mais pontos de *fixação* do cabo?

Fonte: STOCKBRIDGE[1]

A Física e as Engenharias Aeronáutica e de Produção Mecânica: ressonância de terra

A estrutura de um helicóptero possui partes com resposta elástica (pneumáticos e/ou amortecedores no trem de pouso e nas aspas) e, portanto, terá frequências de ressonâncias naturais. A *ressonância de terra* é um fenômeno destrutivo que pode ocorrer quando um helicóptero, de três ou mais pás, está pousado com o rotor em funcionamento. Se por algum motivo ocorrer um desbalanço, que desalinhe o eixo de rotação da direção vertical, o helicóptero experimentará impulsos exercidos pela força de reação do chão sobre o trem de pouso. Essa excitação tem a periodicidade da rotação da hélice e constitui uma condição de oscilação forçada da estrutura do helicóptero. Se a frequência dessa excitação coincide com uma frequência natural da estrutura, o sistema oscilará com grande amplitude. O fenômeno de ressonância de terra é um processo divergente – maiores amplitudes de oscilação causam maiores desalinhamentos e, portanto, maior intensidade dos impulsos aplicados pelo chão. O processo é capaz de destruir completamente a estrutura da aeronave em segundos. A ocorrência dessa condição pode ser neutralizada, no projeto do helicóptero, determinando a calibração apropriada dos amortecedores para dissipar a energia mecânica das vibrações e deslocar as frequências naturais para faixas que não coincidam com o regime de rotação em pouso.

Um fenômeno semelhante ocorre com a máquina de lavar roupas quando a carga fica desbalanceada – o sistema receberá impulsos periódicos do chão, com a frequência da rotação do motor. Se esses impulsos coincidem com uma frequência de vibração natural da máquina, esta vibrará com grande amplitude. É por esse fenômeno que a máquina possui um conjunto de amortecedores de molas e pesos de compensação, que devem ser projetados cuidadosamente para minimizar a amplitude de oscilação em ressonância ou

Essa relação não depende do tempo, o que significa que as amplitudes $x_0(\Omega)$ serão constantes. Analisando, em detalhe, a equação (11), observamos que deverá ocorrer um *máximo* para a amplitude de oscilação x_0 quando o denominador desta equação corresponder a um *mínimo*. Essa condição ocorre quando a frequência da força externa Ω é igual a certo valor particular Ω_{max} , chamado de *frequência de máxima amplitude de oscilação.*

$$\Omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\gamma^2} \quad . \tag{12}$$

Para o caso especial de amortecimento nulo (γ=0) resulta em $\Omega_r = \omega_0$, ou seja a amplitude de máxima oscilação coincide com a frequencia de ressonância do sistema. Nessa situação simples, $x_0(\Omega)$ é pequeno quando $\Omega \neq \omega_0$ e tende a infinito quando $\Omega = \omega_0$. Como na realidade há sempre algum amortecimento ($\gamma \neq 0$), a amplitude de oscilação $x_0(\Omega)$ permanece sempre finita, embora possa se tornar muito grande quando $\Omega \sim \Omega_r$. Este fenômeno é conhecido como *ressonância;* a oscilação terá a grande amplitude quando a frequência da força externa coincidir com a frequência natural do sistema, que nesta situação particular e denominada de frequência de ressonância do sistema. Na figura 3.2 está representada a relação (11) como função da razão entre a frequência de excitação Ω e a frequência do oscilador livre ω_0. As diferentes curvas correspondem a diferentes valores do fator de amortecimento. É possível observar que quanto menor o amortecimento, maior a amplitude de oscilação, especialmente para frequências próximas da ressonância. Observe que a posição da Ω_r muda levemente quando o coeficiente de amortecimento aumenta.

Questão: A frequência de ressonância é igual à frequência do oscilador livre? É maior ou menor? Os valores são próximos ou não?

1.2 Experimental

O oscilador massa-mola está montado verticalmente em um suporte, mostrado na figura 3.3. Para analisar o comportamento do oscilador amortecido, a massa é colocada para oscilar dentro de uma proveta com água. O oscilador pode trabalhar de modo forçado, simplesmente deslocando periodicamente na direção vertical, o ponto de suspensão da mola. Para isso, é utilizada uma alavanca acoplada a um disco girante com velocidade angular Ω constante, como mostrado na figura 3.3.b. A rotação é produzida por um motor elétrico, cuja frequência Ω pode ser variada.

1.3 Procedimento

As vídeo-aulas para coleta dos dados a serem utilizados nas análises podem ser encontradas no seguinte link abaixo. Procure pelas videoaulas com os títulos mencionados.

https://www.youtube.com/playlist?list=PLDre2jYH3njjMv8cYlDXmIZCO1qB5h9CU

1.3.1 Aproximações de oscilações simples no ar

Vídeo aula correspondente: Oscilador Harmônico Simples: sistema massa-mola e pêndulos (com coleta de dados)

A situação onde os sistemas físicos massa-mola e pêndulo físico são tratados como osciladores harmônicos simples é apresentada no vídeo **Oscilador Harmônico simples: Sistema massa-mola e pêndulos (com coleta de dados).** Os dados experimentais a serem coletados para a análise aqui propostas são apresentados a partir de **1:06:51** deste vídeo. Obs: a incerteza nas medidas de massa apresentada é de 0,01 g.

a) No primeiro experimento apresentado no vídeo você deve usar os dados apresentados para determinar a constante elástica da mola que será usada nos experimentos usando a Lei de Hooke.

- Assista o vídeo correspondente a essa parte, anote as sucessivas posições de equilíbrio as massas correspondentes. Para cada situação determine a elongação da mola para cada uma das massas penduradas.
- Construa um gráfico da força aplicada (peso das massas em cada situação) como função da elongação. Faça um ajuste linear da curva determine a constante elástica da mola.

b) No segundo experimento apresentado no vídeo é mostrado a oscilação de um sistema massa mola no ar que, no caso de poucas oscilações - até ~ 30, é uma excelente aproximação para um oscilador harmônico simples.

- Usando a massa do corpo pendurado apresentada no vídeo e a constante elástica da mola determinada no item anterior, calcule o período de oscilação esperado para ao sistema massa mola.
- Determine o período de oscilação diretamente a partir das oscilações do sistema apresentadas no vídeo.
- Compare o período medido diretamente com o calculado e discuta a concordância entre os resultados. Aponte as principais fontes de erros envolvidas.

c) O terceiro experimento apresentado no vídeo trata da oscilação de um pêndulo físico em pequenas amplitudes, que também é uma boa aproximação para um oscilador harmônico simples.

- Considere inicialmente a articulação próximo a extremidade da barra (primeira situação discutida no vídeo). Considerando as dimensões e massas apresentadas calcule o momento de inércia do pêndulo em relação a essa articulação utilizando as conhecidas expressões para momento de inércia de vários objetos. Dica: você pode aproximar a haste por uma haste fina de massa *M* e o corpo de massa *m* pode ser considerando uma massa pontual localizada na posição do seu centro de massa.
- Para determinar o momento de inércia do pêndulo físico a partir do seu período de oscilação é necessário conhecer a distância do seu centro de

massa até o ponto de articulação. Assim será necessário determinar a posição do centro de massa do pêndulo. Faça isso utilizando os dados de dimensão e massa apresentados no vídeo. Novamente você pode aproximar a haste por uma haste fina de massa *M* e o corpo de massa *m* pode ser considerando uma massa pontual localizada na posição do seu centro de massa.

- Determine o período de oscilação do pêndulo físico (em relação a articulação próxima a extremidade) diretamente a partir das oscilações apresentadas no vídeo. A partir do valor obtido, da massa do sistema, da distância da articulação até o centro de massa e da aceleração da gravidade, determine o momento de inércia do pêndulo físico.
- Compare os valores de momento de inércia medidos diretamente e a partir do cálculo geométrico e discuta a concordância entre os valores. Aponte as possíveis fontes de erros para cada medida.
- Repita os quatro itens anteriores considerando o pêndulo físico oscilando em torno de uma articulação no centro da haste tal como também apresentado no vídeo.

1.3.2 Amortecimento das oscilações no ar.

Vídeo aula correspondente: Oscilador Harmônico Amortecido: regimes de amortecimento em sistemas massa-mola (com coleta de dados)

No primeiro experimento apresentado no vídeo, o oscilador massa-mola no ar é tratado de forma mais realista, ou seja, considerando os efeitos de amortecimento. Os dados experimentais a serem coletados para a análise aqui propostas são apresentados a partir de **1:01:18** do vídeo mencionado acima. Obs: Para facilitar as análises propostas neste item é altamente recomendável que você assista também a parte do vídeo correspondente a regimes e tipos de amortecimento.

- Assista a parte correspondente do vídeo e siga os procedimentos indicados de modo a coletar os dados a amplitude de oscilação a cada vinte oscilações completas.
- Utilize o período de oscilação determinado no item 1.4.1 b) para determinar o tempo transcorrido a cada vinte oscilações.
- Faça um gráfico em escala linear da amplitude da oscilação como função do tempo de modo a obter a função de amortecimento.

- Faça um gráfico dessa mesma função em escala mono-logarítmica. É possível inferir deste comportamento qual é o tipo de amortecimento (atrito linear ($-bv$) ou quadrático ($-cv^2$)? Caso a resposta seja positiva, faça um ajuste da curva utilizando o modelo de amortecimento adequado estime o parâmetro de amortecimento ($\gamma = b/2m$ no caso do modelo $-bv$ ou D no caso de $-cv^2$ – Veja as funções de amortecimento propostas no vídeo para cada caso)

1.3.3 Amortecimento das oscilações na àgua.

Vídeo aula correspondente: Oscilador Harmônico Amortecido: regimes de amortecimento em sistemas massa-mola (com coleta de dados)

Nos experimentos apresentados nesta parte, o oscilador massa-mola na água considerando os efeitos de amortecimento. Os dados experimentais a serem coletados para a análise aqui propostas são apresentados a partir de **1:06:58** do vídeo mencionado acima. Para facilitar as análises propostas neste item é altamente recomendável que você assista também a parte do vídeo correspondente a regimes e tipos de amortecimento.

a) No segundo experimento apresentado no vídeo é mostrado a oscilação de um sistema massa mola na água com o objetivo de se medir o período da oscilação. Assista a essa parte do vídeo e siga as orientações apresentadas de modo a determinar o período de oscilação diretamente a partir das oscilações apresentadas para o sistema.

b) No terceiro experimento apresentado no vídeo, o oscilador massa-mola na água é tratado considerando os efeitos de amortecimento.

   - Assista a parte correspondente do vídeo e siga os procedimentos indicados de modo a coletar os dados da amplitude de oscilação a cada oscilação completa.
   - Assista também a parte correspondente do vídeo que compara qualitativamente oscilações com duas diferentes amplitudes iniciais.
   - Utilize o período de oscilação determinado no item a) para determinar o tempo transcorrido a cada oscilação.
   - Faça um gráfico em escala linear da amplitude da oscilação como função do tempo, de modo a obter a função de amortecimento.
   - Faça um gráfico dessa mesma função em escala mono-logarítmica.

- Com base nos resultados anteriores é possível inferir qual é o tipo de amortecimento (atrito linear $-bv$ ou quadrático $-cv^2$) mais adequado para descrever o sistema? Justifique a sua resposta baseada nas características das curvas de amortecimento e nos comportamentos esperados para cada tipo de amortecimento. Caso a resposta seja positiva, faça um ajuste da curva utilizando o modelo de amortecimento adequado e estime o parâmetro de amortecimento ($\gamma = b/2m$ no caso do modelo $-bv$ ou D no caso de $-cv^2$ – Veja as funções de amortecimento propostas no vídeo para cada caso).

1.3.4 Oscilação forçadas

Vídeo aula correspondente: Oscilador Harmônico Forçado: ressonância mecânica (com coleta de dados)

Nos experimentos apresentados nesta parte, o oscilador massa-mola amortecido é forçado a oscilar no ar e na água por uma força externa periódica de frequência ω . O objetivo seja caracterizar a curva da amplitude de oscilação como função da frequência ω e analisar as características dessa curva. Os dados experimentais a serem coletados para a análise aqui propostas são apresentados a partir de **42:50** do vídeo mencionado acima.

a) No vídeo e apresentado uma medida da massa oscilante, que neste caso corresponde a um corpo de chumbo, uma bolinha de isopor e um disco de alumínio. Utilizando o resultado da medida da massa e a constante elástica da mola determinada no item 1.4.1 a), calcule a frequência natural de oscilação desse sistema.

b) A partir de 47:00 do vídeo é apresentado o procedimento de coleta de dados e, logo em seguida, em 50:00 se apresenta a filmagem do experimento. Siga o procedimento indicado e obtenha a amplitude de oscilação e o período da força motora correspondente.

c) Faça um gráfico das amplitudes de oscilação coletadas em função da frequência da força motora (determinada a partir do período).

d) Do gráfico, determine a frequência de máxima amplitude de oscilação. Compare o valor obtido com a frequência natural de oscilação do sistema. Os valores coincidem? O que significa o resultado dessa comparação em termos do grau de amortecimento do sistema.

e) Repita os itens de a) a d) considerando agora a parte do vídeo que apresenta o sistema massa mola oscilando na água (resultados apresentados a partir de 56:30).

f) Determine a largura a meia altura das curvas das amplitudes de oscilação como função da frequência da força motora para os dois casos analisados (oscilações no ar e na àgua). Compare esses valores e discuta a diferença à luz do grau de amortecimento em cada sistema. Compare também a diferença entre a frequência de máxima oscilação e a frequência natural do sistema em cada caso. Discuta qualitativamente observado à luz do grau de amortecimento em cada sistema.

Bibliografia

TIPLER, P. A. **Física.** 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1999. v. 1.

Referências

1 STOCKBRIDGE damper. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Stockbridge_damper> . Acesso em: 20 jul.14.