

Calculando e construindo uma base flutuante antivibratória para componentes

► Víctor A. Mirol

No Hi-Fi Show da Revista, realizado no Hotel Meliá, em setembro passado, tivemos a oportunidade de comentar sobre o interesse demonstrado pela nossa linha editorial em publicar matérias abrangendo temas que, mesmo sendo muito importantes para o leitor interessado em música, são geralmente descuidados pelas publicações de *High-End*. Refiro-me aos temas que não enfocam os equipamentos em si, mas ao ambiente onde eles são utilizados. Dizendo isto estou mencionando, basicamente, os sistemas elétrico e acústico (existem outros aspectos).

Dentro do ambiente acústico em que os nossos componentes estão imersos, existem vibrações que provêm tanto da música sendo executada, como de outras fontes de ruído. Estas podem ser externas – ruído ambiental fora da sala de audição, trânsito, aviões, vibração própria do terreno, etc. – ou internas, como motores diversos (ar condicionado, condicionadores de umidade e outros), fechamentos de portas, passos de pessoas no ambiente e outros.

Nas últimas décadas, tem sido constante a atenção dada por projetistas e RCEAs aos componentes passivos dos sistemas de áudio. Foi evidenciada, cada vez mais, a importância de detalhes de desenho e características do material empregado para a fabricação de capacitores, resistores, atenuadores, cabos de interconexão (analogica e digital) ou de falantes, cabos de força, suportes de componentes eletrônicos e de alto-falantes e muitos outros.

Escolhemos, desta vez, um tema que, embora reconhecido como

importante, tem sido tratado muitas vezes de forma empírica e até, às vezes, mágica: o controle das vibrações e da realimentação acústica por meio de isoladores que associam elementos elásticos com massas de inércia. Pretendemos que o leitor, após o estudo atento do tema, tenha condições de avaliar melhor os recursos que estão ao seu alcance para minimizar seu efeito deletério na qualidade musical, que o faça de uma maneira racional e que possa, no final, construir um ou vários sistemas ressonantes para isolar seus componentes – ao menos os mais sensíveis – de vibrações e de realimentação.

O tema foi já tratado pioneiramente por Holbein Menezes nestas páginas, anos atrás, inclusive dando algumas idéias e sugestões construtivas. Desta vez, abordaremos o tema dando uma base teórica mais aprofundada que, entendemos, é hoje absolutamente necessária para o estado atual de evolução dos nossos leitores que, como pudemos verificar no último Hi-Fi Show e em conversas telefônicas ou e-mails, exigem um tratamento mais completo e cientificamente mais adequado das diversas questões que surgem em nosso *hobby*.

Ouvem-se muitas opiniões baseadas no "achômetro" e em restrito fundamento científico que servem unicamente para aumentar a confusão do audiófilo que as lê e ouve. Em conversa recente com o Eng. José C. Giner e com Fernando Andrette, coincidimos que é hora de colocar as discussões dos temas pertinentes em um nível adequado, que deixe

de lado tanto a mágica, quanto o pensamento pseudo-simples e aprofunde o fundamento técnico e o raciocínio logicamente correto. Creio que devemos deixar de pensar que o nosso leitor é o de quatro ou cinco anos atrás, quando o *Hi-End* era incipiente no país e reconhecer que ele exige hoje não ser tratado como totalmente leigo em temas técnicos. Ou seja, tratá-lo com o respeito que merece. Também significa que devemos deixar de lado a vaga sensação de culpa que poderia nos acometer quando tratamos de componentes ou acessórios de alto preço – que nem sempre nós ou os nossos leitores podemos comprar – e qualidade. Toda arte – ou *hobby* – deve ter referências claras e sem demagogias ao estado da arte atingível em cada momento.

Isto quer dizer, para evitar mal-entendidos, que aqueles elementos que permitem uma abordagem técnica e numérica e que podem ser verificados por testes objetivos serão tratados dessa maneira. Por exemplo, hoje trataremos da forma de obter uma base ressonante – no eixo vertical – em uma frequência determinada. O seu resultado pode ser medido, porque *o objetivo é mensurável: uma frequência de ressonância*. Também queremos dizer que aqueles parâmetros que são ainda inacessíveis a essas medições pontuais continuarão a ser tratados como a lógica e a coerência científica impõe. Por exemplo, *o conceito de que um componente para reproduzir música deve ser ouvido para ser avaliado permanece como base inequívoca do nosso pensamento*. Que as medições atualmente utilizadas na

◀ tentativa de qualificá-los são claramente insuficientes porque foram projetados para outros fins, assim como não se "mede" o sabor da comida de um bom restaurante – ou de seus vinhos, nem se escolhe ou avalia um carro pelas medições de torque e potência do motor, massas suspensas e rigidez do chassi, transparências dos vidros e por aí mais. Uma frase resume a situação: *"... ao César o que é de César"*.

No caso de hoje, obteremos uma frequência mensurável de oscilação. Com isso esperamos bloquear certas vibrações perniciosas. Conclusão única a ser tirada: garanto a vocês uma frequência natural de ressonância determinada no plano vertical. Isto só serve para dizer que, *com muitos componentes e na situação adequada*, observaremos melhora sensível na sonoridade do nosso sistema, o que tornará desnecessária grande parte dos habituais sistemas antivibração que existem no mercado. Já esta será, sim, apreciável vantagem musical, somente verificável mediante a *audição do resultado*.

Frequência de ressonância pode ser medida.

Já qualidade auditiva só pode ser verificada ouvindo-se o resultado.

Isto aclarado, diremos também que aquele que achar que algumas poucas e inevitáveis fórmulas matemáticas ou conceitos básicos de física que serão utilizados neste artigo são de difícil digestão, poderá ir em frente, pois no final terá, de todas as maneiras, a receita do bolo para construir corretamente seu sistema antivibratório sem recorrer a cálculos eventualmente chatos. De todas as formas, as fórmulas estão à disposição para quem quiser ir além e explorar outras opções.

Sabemos que o som é transmitido pelos diversos meios (ar, água, terra, estruturas edilícias, etc.) em forma de onda. Uma onda é uma sucessão de compressões e depressões, onde as moléculas que compõem o meio se movimentam localmente em forma cíclica. A onda, por sua vez, avança em forma concêntrica, muito além do

movimento individual dessas partículas. Digamos que as partículas realizam um movimento cíclico de vai e vem, e a onda, como um todo, avança muito além desse movimento, carregando energia e informação. Toda onda possui alguns elementos que a definem: pressão, velocidade e frequência.

Pela sua característica de "viajar" através do meio, a onda é capaz de conduzir informação a uma velocidade que será dependente do meio (ar, água, terra, etc.). No caso que nos interessa, a música será a informação oscilatória que, chegando finalmente aos nossos ouvidos – e mais, ao nosso cérebro –, será reconhecida como tal. Mas, se lembrarmos que mencionamos "percurso" – ou "viagem" – no meio condutor, saberemos que acidentes de percurso poderão acontecer e é de alguns deles que iremos nos ocupar hoje.

Parte do percurso feito pelas ondas é em meios que possuem massa (ar, membranas de alto-falantes, madeiras, paredes da sala, etc). Outra parte é em meios eletrônicos, analógicos ou digitais (cabos, pré-amplificadores, conversores, amplificadores, decodificadores, etc), onde a onda em si consiste em variação de fluxo – ou vai e vem – de elétrons, que não possuem massa, somente carga elétrica. E, parte, será em *transdutores* (microfones, alto-falantes, cápsulas e agulhas) que farão a conversão da onda física no seu equivalente eletrônico e vice-versa e que possuem uma combinação de elementos mecânicos – com massa – e de circuitos de elétrons. Parecem caminhos diferentes e isolados, mas, na realidade, não o são tanto. Estamos acostumados a considerar que o caminho eletrônico é indiferente e não atingível pelo meio acústico, mas não é assim.

Sabemos há muito tempo que as vibrações do meio acústico – seja o ar, ou diferentes materiais – podem influenciar os componentes eletromecânicos (transdutores) e os componentes passivos (capacitores, resistores, etc.). Exemplos claros são os toca-discos, que são muito suscetíveis

à realimentação acústica. Tem sido menos clara a influência que vibrações mecânicas do meio físico podem causar em elementos "eletrônicos" como cabos, resistores, válvulas, conectores e outros. A maior parte deles trabalha imersa em campos magnéticos. Devemos lembrar que qualquer elemento condutor de eletricidade imerso num campo magnético gera, quando se move nesse campo, correntes que se adicionam – ou subtraem – à corrente que neles circula. Assim, devemos lembrar que a vibração de elementos que conduzem correntes elétricas pode, em determinadas circunstâncias, mudar a forma de onda que transmitem. De uma ou outra maneira, vibrações podem introduzir modificações na forma de onda de correntes – fluxos eletrônicos – que transitam nos componentes de áudio, sejam eles do tipo que for. Naturalmente, há diversos graus de susceptibilidade. Os transdutores estão entre os componentes que mais facilmente são prejudicados por vibrações – toca-discos e CD-*players* ou transportes, por exemplo. Outros componentes também são afetados, como pré-amplificadores (especialmente valvulados e estágios de fono), decodificadores, e outros.

Duas são as formas através das quais as vibrações podem afetar nossos sistemas.

Trataremos, em primeiro lugar, das provindas do meio externo. Temos, então, basicamente, o ruído. Já dissemos que este pode ter diversas origens. É importante mencionar que as vibrações podem se manifestar em diversos planos. As provindas do solo, por exemplo, podem ter componentes importantes no plano horizontal, assim como as criadas pelo próprio funcionamento de alguns transdutores. Toca-discos e CD-*players*, por exemplo, criam vibrações predominantemente no plano horizontal, que é o plano de giro – quase sempre – dos discos. LPs imporão vibrações de 0,56 Hz (33,33 rpm) 0,75 Hz (45 rpm) e os sistemas braço-cápsula terão tendência a vibrar

◀ na ordem dos 8 a 12 Hz, além dos harmônicos correspondentes. Os CDs girarão a regimes entre 200 rpm (3,33 Hz), quando lendo as faixas mais externas, e 500 rpm (8,33 Hz), quando lendo as faixas internas (diferente de um LP, a velocidade de leitura de um CD é constante e da ordem de 1,2 a 1,4 m/s).

A outra forma é a conhecida realimentação acústica. Desde que a música é transmitida até nós por meio de ondas vibrando no ar e que todos os componentes dos nossos sistemas estão imersos nesse ar vibrátil (salvo se eles estiverem colocados em outra sala, o que é incomum) deduziremos, corretamente, que eles estarão vibrando tanto como os nossos tímpanos (respeitadas as relações devidas de impedância entre o ar e cada componente). Da mesma forma que uma superfície refletiva vizinha ao nosso monitor de vídeo daria reflexos luminosos que perturbariam nossa percepção da imagem mostrada, também os sons (reflexos sonoros) irão modificar os sinais (elétricos ou mecânicos) que percorrem o nosso sistema reproduzidor de áudio. Só que com uma diferença: como a velocidade do som é muito mais baixa, os sinais sonoros emitidos pelos alto-falantes chegarão a esses componentes com um atraso, que chamamos de diferença de fase. Isto quer dizer que um pico de pressão da onda emitida pelo alto-falante chegará ao componente (digamos, o sistema agulha-cápsula-LP) em uma fase que pode ser, dependendo da distância e das frequências envolvidas, igual ou diferente à da ondulação do sulco do disco. Quando esta vibração chegar, a agulha já estará lendo uma outra onda (devido ao atraso do sinal durante a "viagem" lenta pelo ar, comparada com a "viagem" rápida dos elétrons desde a cápsula até os falantes). Se a interferência coincidir em fase (pico de pressão com pico de pressão), haverá a famosa realimentação positiva, ou seja, a vibração da agulha será maior que a informação contida no sulco. Assim, a

próxima onda que atingir o alto-falante será amplificada em relação à original do sulco, e assim indefinidamente, provocando um dos piores efeitos audíveis, tanto em graves, quanto em frequências médias. Em outras situações de fase de arribo, as conseqüências serão diversas, mas sempre alterando a forma de onda original. A pior situação acontece quando a frequência da onda incidente (perturbação) é igual – ou muito próxima – à frequência natural de vibração do componente (por sua vez determinada pela combinação de seus componentes elásticos e massas, como veremos mais adiante).

Tanto no caso mencionado como em outros, as vibrações mecânicas podem ser geradas pelo próprio componente. Por exemplo, esse mesmo toca-disco gerará dois tipos de vibrações: as do disco girando e as próprias do sistema agulha-cápsula-braço. Mesmo nas melhores condições, nenhum componente mecânico consegue deixar de ressoar (vibrar espontaneamente quando excitado por um movimento oscilante, ou vibração) em determinadas frequências que dependem, como veremos mais adiante, da combinação de massas e elasticidades envolvidas. Esta oscilação "adicional", ou "facilitada" implicará, fatalmente, em deformação da forma de onda que estiver transitando no momento, com a conseqüente distorção.

As combinações possíveis são infinitas, como podemos adivinhar. E as soluções não muito abundantes. Existem duas maneiras pelas quais podemos diminuir o efeito dessas vibrações, tanto das espontâneas (excitação de frequências de oscilação próprias do componente) como das induzidas (vibrações externas ou realimentação acústica). Se lembrarmos que todo elemento vibrátil mecânico tende, por definição, a vibrar quando excitado na sua frequência de ressonância com amplitude muito além da que a própria excitação criou, e que esta tendência tende a crescer até o infinito teórico, só temos três formas de limitar esse crescimento: interpomos uma

resistência mecânica a essa vibração (que consumirá parte da energia envolvida, inclusive a útil), provocamos uma vibração de sentido contrário (em oposição de fase) de igual frequência ou utilizamos o recurso que veremos a seguir.

É oportuno, agora, falar do movimento harmônico simples, como é denominado o tipo de movimento cíclico que ocorre quando associados um elemento elástico com uma massa. Um caso é o de um objeto dotado de massa apoiado em – ou suspenso de – um elemento elástico como, por exemplo, uma mola. Imaginemos que amarramos um peso¹ qualquer a uma mola ou uma borracha e o deixamos pender dela com cuidado. Inicialmente, a mola irá se esticar até um momento em que se estabeleça um equilíbrio entre o peso suspenso e a tensão da mola (pode acompanhar o raciocínio com um elástico comum ou uma mola leve e um peso qualquer como um telefone celular ou chaveiro pendurado dele). Se nesse momento medirmos o quanto a mola foi esticada pelo peso, estaremos achando uma importante propriedade de um elemento elástico, qual é o módulo de elasticidade, ou "k", definido como o quociente entre a força que tende a distendê-lo (ou a comprimi-lo) e a magnitude dessa distensão. Em nosso caso, a diferença entre o comprimento do elástico sem peso e o seu comprimento final, uma vez que o objeto suspenso o esticou. Em outras palavras, o quociente força/distância, expresso como F/d , ou, em unidades do sistema MKS², N/metro. Como força é medida em Newton e distância em metros, no sistema MKS o módulo de elasticidade seria medido em N/m. Se quisermos convertê-lo em unidades mais familiares, podemos dividir por $9,8 \text{ m/s}^2$ (aceleração da gravidade) e obter kgf/m ou, ainda, dividir este por 1000 (milímetros por metro) e obter a unidade Kgf/mm. Veremos estas unidades mais adiante. O mais interessante vem agora.

Se, com um movimento rápido da

◀ mão, batemos o peso suspenso, fazendo-o mover-se mais para baixo, esticando mais a mola, ele chegará a esticá-la até um momento em que esta terá a tensão suficiente para trazê-lo ao ponto de partida. Mas a inércia do peso nesse momento fará com que ele continue o seu movimento ascendente até comprimir a mola, de tal forma que esta o repelirá, enviando-o novamente para baixo (no caso do elástico, será a própria força da gravidade que levará de volta o peso para baixo nesta parte do ciclo). Esse movimento oscilatório se repetirá até o infinito se não houver alguma resistência que interrompa o ciclo, consumindo energia. Na prática, essa resistência será uma combinação de resistência viscosa da mola a ser deformada (atrito molecular) e a do ar, que se oporá ao deslocamento do peso. O que acabamos de descrever é um movimento harmônico simples que pode ser ilustrado por uma onda senoidal que descreverá o deslocamento do peso suspenso ao longo do tempo, ou sua velocidade, em fase inversa. Cada vez que o peso passar pelo mesmo ponto, movendo-se no mesmo sentido, terá completado um ciclo. O inverso do ciclo, definido como o *tempo* que demora o percurso do peso suspenso, é a frequência de oscilação, nosso conhecido Hz (ou ciclo por segundo). Então, se o ciclo durar 0,5 segundo, teremos uma frequência de 2 Hz.

Sem entrar em detalhes de desenvolvimento do cálculo, podemos definir todo este movimento harmônico com a fórmula que relaciona elasticidade, massa e tempo.

Sendo que f_n (frequência natural de ressonância)=Hz, k (elasticidade)=N/m, $\pi=3,1416$ e m (massa)=kg, temos:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Uma primeira conclusão a ser tirada é a de que quanto maior a massa ("**m**"), menor será a frequência ("**fn**") e que quanto mais rígida for a mola ("**k**" expresso como a força necessária para esticá-la uma determinada distância), maior será esta frequência. Muito

importante, uma vez que você poderá facilmente, mudando o peso suspenso ou o tipo de mola, mudar a frequência natural no sentido e magnitude que você desejar! Reiterando, para marcar esta característica tão importante:

- quanto *maior a massa* (sentido como "peso"), *menor a f_n* (frequência *natural* de ressonância do sistema, natural no sentido de "espontânea", não influenciada externamente). Notemos que **m** está como denominador na equação.
- quanto *maior a rigidez* (maior o **k**) da mola, *maior a f_n* . Notemos que **k** está como numerador na equação.
- quanto *maior a moleza* (menor o **k**) da mola, *menor a f_n* .

É bom notar aqui que o termo "elasticidade" – e, portanto, módulo de *elasticidade* – deve ser entendido como a característica do elemento elástico de voltar a sua forma original após ser esticado – ou comprimido – desde que não seja alcançado seu ponto de deformação irreversível. O termo não implica em que o material seja mais ou menos "mole", com entenderíamos intuitivamente. De fato, quando definimos esse módulo (**k**) como força/deformação (força necessária para uma determinada mudança no comprimento, ou **F/d** e, por isso, **kgf/mm**, ou **N/m** ou, ainda, **N/mm**) estamos falando da sua *rigidez*, desde que aumentar a força necessária para uma determinada mudança de forma significa maior rigidez do componente "elástico". Notemos que a expressão **k/m** é proporcional à rigidez do elemento, sendo que o inverso, **1/k** (ou **d/f**, deformação dividido pela força necessária) nos mostra a "moleza" do mesmo.

Acompanhemos uma transformação da fórmula que acabamos de mostrar:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \therefore 2\pi f_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \therefore (2\pi f_n)^2 = \frac{k}{m}$$

$$m = \frac{k}{(2\pi f_n)^2}$$

Em outras palavras, para uma determinada "**fn**" a ser obtida com

molas de "**k**" módulo de elasticidade teremos uma massa de valor "**m**" a ser suspensa. Ou, também:

$$k = (2\pi f_n)^2 m$$

o que nos diz que para que uma massa de valor "**m**" oscile a uma "**fn**", deveremos utilizar uma mola de módulo de elasticidade "**k**".

Um exemplo prático. Uma base de 25 kg suportando um componente de 5 kg fará uma massa total de 30 kg. Se usarmos quatro molas, teremos que cada mola suportaria 7,5 kg. Para fazer oscilar o sistema a 4 Hz teremos que, como cada mola suporta 30 kg/4 =

$$7,5 \text{Kg:}$$

$$k = (2\pi f_n)^2 m = (2 \times 3,1416 \times 4)^2 \times 7,5 =$$

$$= 4.737 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Deveremos utilizar uma mola cujo "**k**" seja de 4.737 N/m, ou seja (dividindo por 9,8) 483 kg/m ou, ainda, (dividindo por 1000) 0,483 kg/mm. Procuraríamos nos catálogos uma mola cujo "**k**" fosse de 0,483 kg/mm ou, dito de outra forma, que encurtaria 1 mm quando fosse aplicado sobre ela um peso de 483 gramas. Dizer 4.737 N/m – e igual a dizer 483 kg/m ou dizer 0,483 kg/mm. É só converter unidades. Podemos ver uma imagem esquemática do sistema no *box* do Eng. André na página 42.

Com o exposto, temos com passar a considerar uma aplicação útil e configurável do conceito de massa suspensa.

Antes, expliquemos uma propriedade fundamental de um sistema oscilante como este que estamos considerando. As vibrações do chão serão transmitidas através das molas para a base suspensa. Não entanto, essa transmissão não será integral. Se a frequência de vibração ("**fv**") for inferior a 1,41 vez da "**fn**", não haverá atenuação e, se "**fv**" for igual a "**fn**" haverá, ao contrário, aumento da vibração da base. Esse aumento poderá ser muito grande. Se "**fv**" for superior a 1,4 vez "**fn**", haverá atenuação, tanto maior quanto maior for a diferença. A fração da vibração que atinge o componente sobre a base é chamada de *transmissibilidade* ("**Tr**") e o seu inverso, *graude isolamento* ("**I**"). ▶▶

Podemos colocá-lo em números:

$$Tr = \frac{1}{\left(\frac{fv}{fn}\right)^2 - 1}$$

Como o Eng. André mostra no box, um Tr de 0,125 equivale a um grau de isolamento $I=87,5\%$ ($1-0,125$) $\times (100)$. Se quisermos ver a atenuação em termos de equivalência sonora (dB), deveríamos dizer que Tr de 0,125 significa $1/0,125 = 8$ vezes de atenuação da vibração. Se aplicarmos $20 \times \text{Log}(8)=18,06$ teremos o valor equivalente em dB.

Como regra geral, o comportamento do sistema, em termos da transferência de forças excitatórias entre a base suspensa e o chão (e vice-versa) comporta-se em função da relação da (frequência de ressonância natural) e a (frequência excitatória).

- Para $fv/fn < \sqrt{2}$ existe aumento da vibração induzida. No caso particular de $fv=fn$, a facilitação vibratória de um lado a outro do sistema é máxima e somente limitada pelas resistências viscosas do sistema.
- Para o caso de $fv/fn > \sqrt{2}$ existe dificuldade crescente à transmissão de excitações, tanto maior quanto maior for fv/fn . Se desprende a importância de obter-se uma fn o mais baixa possível comparando com a fv . Como vimos nas fórmulas anteriores, aumento da massa ou diminuição do k são a forma de aumentar o isolamento vibracional.

Estes cálculos são mostrados para evidenciar a relação que cada um dos componentes do sistema têm entre si. Os leitores não precisam

ficar preocupados se o seu forte não for o cálculo algébrico, pois no site será publicada uma planilha eletrônica com todos os passos necessários para calcular e construir a base flutuante de forma automática.

Uma descrição sobre base intuitiva de como funciona um sistema deste tipo é assim. Imagine o pico de pressão de uma onda perturbadora provinda do chão. Se a base de granito estivesse apoiada nele, seria imediatamente deslocada para cima e a onda seguiria seu caminho até o componente colocado acima. Como a onda encontra as molas, empurra a base delas que, por serem elásticas, comprimem-se progressivamente até atingir a base de granito que, por ser pesada, demora algum tempo a começar a se movimentar. Quando finalmente começa a fazê-lo, a base da mola já está voltando a descer, pois a depressão da onda perturbadora já está chegando na sua base. Dessa maneira, há um atraso na transmissão pelas molas, que faz com que a força que atinge a base granítica seja muito defasada e de intensidade menor do que se estivesse apoiada no chão. Quando a base começa a receber a pressão da onda, as molas já estão no caminho inverso, devolvendo ao chão a força inicial e estão iniciando seu alongamento, com o qual puxarão da base antes que ela complete seu movimento ascensional. Poderíamos admitir que a oscilação da onda perturbadora se esgota dentro da própria mola, sem dar tempo para fazer a massa suspensa se movimentar. Isto constitui uma atenuação da passagem da energia da onda, e acontece – e bom frisar – quando a

frequência incidente é maior que a fn (estritamente falando, maior que $fn \times \sqrt{2}$, como vimos mais acima).

Para quem estiver familiarizado com circuitos eletrônicos, lembro que o circuito equivalente a este sistema seria o de uma indutância em série com uma capacitância cuja frequência de ressonância seria aquela na qual a reatância indutiva é igual e oposta à reatância capacitiva e ambas se cancelam, restando somente o componente resistivo (que sempre está presente em sistemas reais formando um circuito RCL). Se este for baixo, não haverá resistência ao fluxo de corrente alternada, no caso mecânico, vibrações. O que em mecânica é

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}}, \quad \text{é, em eletrônica,} \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

, sendo que $\omega = 2\pi fn$. Para o leitor atento que implicar com o elemento "C" (capacitância) no denominador, lembro da explicação dada mais acima, onde se mostra que o elemento elástico (equivalente à capacitância no circuito elétrico) definido como "k" é, na realidade, rigidez, ou o inverso de "moleza" que definiria a capacitância elétrica.

A planilha Excel para cálculo da frequência natural de oscilação pode ser obtida à partir do site da CAVI (www.clubedoaudio.com.br/fazer3.htm).

Os passos de nosso projeto seriam, então, os seguintes: dado o peso do componente que desejamos isolar, escolhemos um peso inicial de 5 a 10 vezes maior para peso da base de granito. Determinamos o limite inferior das fv que queremos bloquear

1 Utilizamos o termo "peso" por ser mais intuitivo que "massa". Peso é a consequência de uma massa submetida à aceleração da gravidade na superfície da Terra, definida pela segunda lei de Newton como uma relação: $F=ma$. F (força) seria igual ao produto de m (massa) por a (aceleração causada pela atração gravitacional do planeta). Quanto maior a massa (que poderíamos definir, para melhor compreensão, como "quantidade de matéria", embora não seja exatamente isso) maior a força, desde que a aceleração se mantenha constante, como é o caso do campo gravitacional. Pois bem, essa tal força é exatamente o que percebemos como "peso": é a força que um objeto exerce contra algo que o mantenha estático (sem se mover no sentido do centro da terra, ou seja, sem cair no chão). Esse algo pode ser a nossa mão quando mantemos o objeto e percebemos o seu "peso". Essa força é expressa com a unidade **Newton**, definida, no sistema de unidades MKS, como a força que acelera uma massa de 1 kg a 9.80655 m/s, que é a aceleração da gravidade. Veja que o "kg" mencionado é uma unidade de medida de massa. O peso, desde que acabamos de defini-lo com uma força, seria definido, então, como Kgf, ou kilograma-força. Este é a força que exerce um kg-massa na superfície da terra. Equivale a 9,8 Newton. Estas definições são importantes pelo que veremos a seguir no cálculo de massas suspensas oscilantes. Usaremos, indistintamente, o termo kg como equivalente a massa ou a peso.

2 Dentro do sistema decimal de medidas, o MKS é o que expressa as magnitudes como M(etro), K(ilograma) e S(egundo), correspondentes a distância, massa e tempo, respectivamente. O outro é o CGS (de centímetro, grama e segundo).

◀ e o nível desse bloqueio para obter a **fn** do sistema (ver *box* do Eng. André). Podemos, alternativamente, obviar este passo e determinar uma **fn** relativamente baixa, 4 Hz, por exemplo e ir adiante. No final, poderemos calcular o **Tr**. O cálculo nos dirá o **k** das molas necessárias, que buscaremos no mercado (um exemplo de tabela será encontrado no site da revista). Se o sistema parece estar respondendo às nossas necessidades, passaremos a comprar os elementos necessários. Sempre poderemos mudar a massa suspensa ou as molas para corrigir o comportamento, para usar como base de outro componente ou simplesmente para experimentar. Com o exemplo, um catálogo do único fabricante que estava a meu alcance está publicado no site.

Um detalhe a destacar é que nestes cálculos – e na planilha publicada no site – consideramos somente um grau de liberdade (o do movimento da base em sentido vertical). Se conseguirmos algum catálogo de fabricante que nos forneça os **k** horizontais de molas de tipo adequado para este modelo, incorporaremos os cálculo na planilha para que o leitor possa calcular também a ressonância horizontal e, dessa maneira, adequar o sistema a outras frequências encontradas habitualmente nos CD-*players* e toca-discos. Aclaro que, usando uma massa 5 a 10 vezes superior à do componente, a possibilidade de o componente ser vítima de realimentação acústica é muito pequena, já que a massa da base é um obstáculo grande – quando comparado à massa do próprio componente – para que o componente entre facilmente em ressonância por influência da onda sonora. Os principais problemas costumam ser os da vibração do chão e os da vibração acústica sobre componentes de grande superfície e pouca massa. Recomendo não usar nenhum tipo de acoplamento elástico entre o componente e a base para evitar criar outro modo de ressonância que, inevitavelmente, seria de frequência mais alta que a da base (os elastômeros usualmente empregados são mais rígidos que as molas e a

massa do componente é menor que a da base, configurando uma alta **fn**) e anularia, parcialmente, os benefícios de usar este sistema descrito. Se encontrar problemas com ressonâncias horizontais, poderia usar, no máximo, dispositivos não elásticos que permitam deslocamento horizontal do componente sobre a base, como, por exemplo, os produzidos pela Airon com o nome de Shindo ou também como os Daruma.

A prática da montagem é simples. Escolhido o peso, peça que corte uma base que, tendo o peso pretendido, tenha uma medida que exceda por pouco as medidas do componente a ser instalado nela. Não use uma base muito larga, prefira que seja grossa para obter o peso pretendido. Recebido o mármore, deverá encontrar uma forma de fixar as molas na sua base o mais afastado possível entre si. Poderia ser feito um rebaixo circular no ponto de assento das molas na base e/ou usado um adesivo na primeira espira da mola. As molas devem ser apoiadas diretamente no chão ou acima de prateleiras, sendo recomendável que estas sejam adequadas e firmes. O componente deve ser colocado sobre a base em um ponto tal que seja possível observar que as quatro (ou mais) molas afundem à mesma distância. Use um nível e uma régua para essa verificação. Assimetria neste ponto poderia fazer existir modos de ressonância combinados entre o vertical, o horizontal e o rotacional dando resultados imprevisíveis. Recomendo prestar atenção (a planilha já incorpora um elemento de advertência sobre este ponto) à proporção entre o diâmetro da mola (sua base de apoio) e a sua altura, para evitar molas muito altas que criem instabilidade da base apoiada sobre elas. Dê preferência às molas largas no lugar das altas.

Apóie, como dito anteriormente, o componente em forma rígida sobre a base, ou use dispositivos de deslocamento horizontal. Não use elastômeros ou materiais elásticos.

Antes de obtermos listas de molas utilizáveis com valores de **k** horizontal, os componentes que seriam beneficiados com este sistema seriam, na ordem mencionada: pré-amplificadores valvulados,

pré-amplificadores de estado sólido, conversores digital-analógicos, *receivers* de áudio-vídeo, CD e DVD *players*, toca-discos. Escolhendo frequências vizinhas a 3 ou 4 Hz, todos eles, inclusive os *players* e toca-discos deveriam funcionar bem e brindar grande melhora em termos de plano sonoro, equilíbrio tonal, estabilidade de imagem e transientes.

O jogo com diversos valores permitirá compreender melhor o papel de cada um deles no comportamento do sistema oscilante e sua eficácia para diminuir o efeito de vibrações e ruído. Lembrese de experimentar diversos valores até encontrar aqueles que permitam um afundamento razoável das molas sem perturbar a estabilidade do conjunto. Escolha também a relação de aspecto adequada das molas com o mesmo objetivo. Não pretendo me responsabilizar por danos causados pelo uso da planilha!

Espero que possam tirar proveito e divertimento deste artigo. Dúvidas poderão ser enviadas por e-mail e serão respondidas na medida do possível. Se houver muitas dúvidas parecidas, serão respondidas no próximo artigo complementar que, espero, inclua o cálculo da oscilação horizontal.

Divirta-se sem arriscar um componente no chão! Lembrem-se sempre de que qualquer objeto sobre uma base flutuante é mais propenso a quedas acidentais! Se tiver dúvidas, consulte um especialista, lojista ou alguém mais experiente. Envie fotos ou descrições das engenhocas que construírem, se for do seu agrado. Gostaria de recebê-las!!

Muito recomendo, a quem quiser se aprofundar no tema, o quem quiser informações adicionais expostas com mais propriedade, visitar os *sites* mencionados abaixo.

Boas experiências e melhores audições!

Referências (INTERNET)

<http://www.ufsm.br/gef/CadOnd.htm>
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/shm2.html>
<http://www.if.ufrj.br/teaching/fis2/oscila/oscilacoes.html>
http://www.feiradeciencias.com.br/sala04/04_RE_11.asp

Conceitos

Diversas são as situações em que desejamos isolar um equipamento das vibrações presentes ao seu redor. A este tipo de isolamento dá-se o nome de passivo, em oposição ao isolamento ativo que consiste em isolar o meio circundante das vibrações produzidas por uma determinada máquina.

Exemplos de aplicações para isolamento passivo incluem o isolamento de microscópios, balanças de precisão e outros equipamentos sensíveis, cuja performance possa ser degradada na presença de vibrações. Estas, muitas vezes, são geradas pela operação de máquinas em áreas próximas (por exemplo, um aparelho de ar condicionado) mas podem ter outras origens, tais como fábricas, linhas de metrô próximas e terremotos.

Em ambos os tipos de isolamento o conceito é o mesmo. Considera-se um sistema formado por uma massa, uma mola e, quando aplicável, um amortecimento. O conceito de mola é aqui apresentado de forma genérica, incluindo não apenas as molas helicoidais como também elastômeros (borracha, neoprene) ou qualquer outro material com função elástica.

Equação do sistema massa-mola

O sistema massa-mola descrito acima, (desprezando-se a presença de amortecimento) é representado pela equação diferencial:

$$mz'' + kz = F(t) \quad (1)$$

Onde:

z é a massa total do sistema (máquina + base)

k é a constante elástica da mola

z é a posição da massa

z'' é a aceleração da massa

$F(t)$ é a força dinâmica aplicada, que causa a vibração do sistema

A solução da equação (1) acima para

$F(t) = 0$, produz as chamadas frequências naturais do sistema.

Para cada grau de liberdade deste sistema, i.e. para cada eixo em torno do qual o sistema puder rotacionar ou transladar, corresponde um modo de oscilação e uma frequência natural própria.

No caso da oscilação vertical, p.e. a solução de (1) fornece:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

A solução da equação acima requer um certo conhecimento de cálculo diferencial e será aqui omitida. Entretanto, é importante entender o conceito de frequência natural. A frequência natural é aquela em que o sistema, na ausência de atrito, oscilaria livremente se puxássemos o mesmo e em seguida o soltássemos.

Grau de isolamento do sistema

A transmissibilidade do sistema, isto é, o quanto de vibração aplicada é transmitida ao meio adjacente, é função da frequência natural f_n do sistema e é dada pela seguinte fórmula, onde f representa a frequência das forças de vibrações incidentes.

$$T = \left| \frac{1}{\left[\frac{f}{f_n} \right]^2 - 1} \right| \quad (3)$$

e o grau de isolamento do sistema:

$$I = (1-T).100 \text{ [%]} \quad (4)$$

As equações 2, 3 e 4 acima nos mostram:

- 1 - Para reduzir a transmissão de vibrações, f_n deve ser o menor possível. As molas helicoidais de aço oferecem f_n menores, razão pela qual elas são preferidas em relação às borrachas e demais elastômeros quando é necessário um alto grau de isolamento.
- 2 - A transmissibilidade é infinita quando $f = f_n$!! Quando existe o risco de a frequência de excitação do sistema igualar sua frequência natural (p.e., quando um motor parte do zero e acelera até a sua rotação nominal), deve-se fazer uso de algum tipo de amortecimento, visando minimizar a situação de ressonância acima.
- 3 - Observando agora a equação (2) percebemos que podemos reduzir a frequência natural aumentando a massa m .

Esta última é a razão pela qual, em geral, adicionamos massa ao nosso sistema para obter um melhor isolamento, como por exemplo, quando colocamos uma placa de granito sobre uma borracha para fazer uma mini-base flutuante para um leitor de compact-disc.

Caso prático

Para finalizar, vamos tomar um caso prático de projeto:

Suponha que queremos isolar um rack de equipamento de áudio sensível a vibrações, pesando 150kg e para isso desejamos montá-lo sob uma base flutuante. Para tanto possuímos quatro molas com constante elástica vertical de 240.000 N/m cada. Gostaríamos que o sistema fosse isolado com um grau de isolamento de 87,5%. Sabendo-se que a menor frequência incidente f observada em pisos geralmente é da ordem de 12Hz, pergunta-sez:

- 1 - Qual é a frequência natural necessária do sistema para se atingir o grau de isolamento desejado?

$$I = 87,5\% \\ f = (1-T).100 \\ 87,5\% = (1-T).100 \\ T = 0,125 \\ 0,125 = \left| \frac{1}{\left[\frac{f}{f_n} \right]^2 - 1} \right| = \left| \frac{1}{\left[\frac{12}{f_n} \right]^2 - 1} \right|$$

$$f_n = 4\text{Hz}$$

- 2 - Qual é a massa necessária da base para se atingir esta frequência natural?

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \\ 4 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{240000 \times 4}{m}} \\ \sqrt{\frac{240000}{m}} = 8\pi \\ m = 1.519\text{kg}$$

Descontando-se a massa do aparelho de 150kg, temos:

$$m_{\text{base}} = 1.519 - 150 = 1.369\text{kg}$$

Conte com um especialista

As equações e exemplo acima nos permitem ter uma idéia inicial dos fundamentos de isolamento de vibrações. Em aplicações práticas, outros fatores devem ser considerados, tais como limites de excursão das molas, a geometria da base, do equipamento, a posição do mesmo sobre a base e a consideração de todos os modos de oscilação envolvidos. No exemplo acima, apenas o modo de oscilação vertical foi considerado. Na dúvida, sempre é válida a consulta a um especialista em isolamento de vibrações que poderá lhe indicar a opção com o melhor custo benefício, baseado nas suas necessidades.

Bibliografias

- [1] - Kinsler LE, Frey A.R., Coppens A.B. and Sanders J.V., Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, 1982
- [2] - Müller H.A, Heckl M., Taschenbuch der Technischen Akustik, Springer-Verlag, 1995
- [3] - Barber Antony, Handbook of Noise And Vibration Control, Elsevier, 1992
- [4] - Gerb Schwingungsisolierungen GmbH & Co KG, Vibration Isolation Systems, 9th Edition, 1994

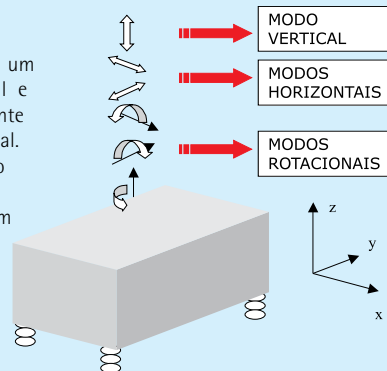


Fig. 1 - Sistema massa-mola e seus graus de