

# **REATOR DINÂMICO PARA CONTROLE ATIVO DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS**

Halei Fagundes de Vasconcelos  
Departamento de Física - CCEN  
Universidade Federal da Paraíba  
Caixa Postal 5008  
58.059 - 970 João Pessoa, PB  
Brasil  
[<antares@fisica.ufpb.br>](mailto:<antares@fisica.ufpb.br>)

**Resumo.** *O controle ativo de vibrações de baixas freqüências em estruturas mecânicas, requer a aplicação de forças que se oponham a essas vibrações, as quais se caracterizam por grandes amplitudes de deslocamento. A aplicação dessas forças pode ser feita por meio da reação ao movimento imposto a uma massa suspensa por vínculos flexíveis em um invólucro, o qual é fixado rigidamente na estrutura cuja oscilação se deseja reduzir. Assim sendo, quando a estrutura oscila, a massa suspensa pode ser acelerada por forças eletromagnéticas atuantes na mesma, produzindo forças dinâmicas reativas, em sentido contrário ao movimento da estrutura. Essas forças eletromagnéticas são produzidas por uma corrente elétrica fornecida a duas bobinas, imersas em entreferros circulares nos quais existem fortes fluxos magnéticos. Neste trabalho é apresentado um dispositivo eletromagnético, doravante denominado "reator dinâmico", capaz de gerar essas forças reativas, e são descritas algumas aplicações do mesmo para demonstrar as suas possibilidades como excitador de uso geral e no controle ativo de vibrações de baixa freqüência.*

**Palavras-chave:** vibrações, excitador, reação dinâmica, eletromagnético, ressonância.

## **1. INTRODUÇÃO**

O controle ativo de vibrações de baixas freqüências em estruturas mecânicas requer a aplicação de forças que se oponham a essas vibrações, as quais se caracterizam por grandes amplitudes de deslocamento. A aplicação dessas forças pode ser feita por meio da reação ao movimento imposto a uma massa, suspensa por vínculos flexíveis em um invólucro, o qual é fixado rigidamente na estrutura cuja oscilação se deseja reduzir. Assim sendo, quando a estrutura oscila, a massa suspensa pode ser acelerada pelas forças eletromagnéticas geradas por meio da passagem de uma corrente elétrica em duas bobinas, imersas em dois entreferros da massa suspensa, nos quais existem fortes fluxos magnéticos, produzindo assim uma força dinâmica reativa em sentido contrário ao movimento da estrutura. Neste trabalho é apresentado um dispositivo eletromagnético, doravante denominado "reator dinâmico", capaz de gerar essas forças reativas, projetado e desenvolvido no Departamento de Física da Universidade Federal da Paraíba, Brasil, e são descritas aplicações do mesmo para reduzir o nível de ruído produzido por uma estrutura simples, para detecção de freqüências de ressonância em estruturas, para realizar testes vibratórios em pequenos componentes e com fins didáticos.

## **2. REATOR DINÂMICO**

### **2.1. Princípio de Funcionamento**

O reator dinâmico consta essencialmente de um circuito magnético, suspenso elasticamente no

interior de um invólucro cilíndrico, com 50,3 mm de diâmetro, o qual é dotado de furos roscados nas tampas, para a sua fixação em uma estrutura. A Fig. (1) mostra o reator dinâmico em detalhes. Um fluxo magnético  $B = 0,53$  Tesla nos entreferros é gerado por um ímã de terras raras (Vasconcelos, 1996), de 23 mm de diâmetro por 10 mm de altura, e as demais partes do circuito magnético são construídas em aço doce. Os entreferros têm forma anular, com 30 mm de diâmetro interno, 1,5 mm de largura e 4 mm de altura. Dois suportes fixam o circuito magnético ao invólucro externo por meio de molas especiais, com 0,045 mm de espessura, que possibilitam deslocamentos axiais e inibem deslocamentos transversais do circuito magnético em relação ao invólucro. Duas bobinas fixadas rigidamente ao invólucro externo ficam imersas nos entreferros e são ligadas em série, de tal forma que se somem as forças geradas nas mesmas pela passagem de uma corrente  $I = I(t)$ , onde  $t$  é o tempo. Esta corrente é fornecida por um amplificador de potência de algumas dezenas de Watts de potência, cujo sinal de entrada pode ser produzida por um gerador de sinal, por um acelerômetro, por uma fonte de áudio, etc.

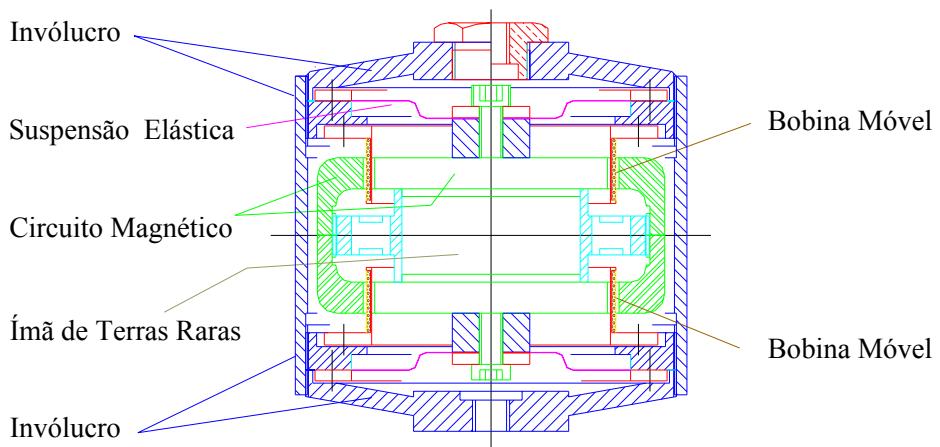


Figura 1. Corte longitudinal do Reator Dinâmico

## 2.2. Características Funcionais

De acordo com a configuração descrita acima, o reator dinâmico não tem partes móveis externas, o que facilita o manuseio durante a sua instalação em uma estrutura, a qual pode ser feita por meio de um parafuso prisioneiro de 3/16" de diâmetro, com 32 fios por polegada, ou NF10. Como os dois extremos do reator são dotados dessas roscas, pode-se acrescentar um acelerômetro na extremidade oposta ao ponto de fixação, ou entre a estrutura e o reator dinâmico. Um acelerômetro piezoelétrico, com 21 gramas de massa sem o cabo e  $1,3 \text{ pC m}^{-1} \text{ s}^2$  de sensibilidade, projetado e desenvolvido pelo autor especialmente para este reator dinâmico, tem rosca NF10 em uma das bases e M10x0,6 da outra, pode ser fixado facilmente no mesmo, conforme ilustrado na Fig. (2).

As taxas de amortecimento da suspensão elástica foram determinadas por meio dos decrementos logarítmicos (Thomson, 1978) em duas condições: (a)  $\xi_{I\text{fix}} = 1,3 \%$ , com o invólucro fixo e (b)  $\xi_{MS\text{fix}} = 2,2 \%$ , com a massa suspensa fixa. No primeiro caso a massa suspensa oscila, enquanto no segundo caso, é o invólucro que oscila. A Fig. (3) mostra os resultados dos testes de amortecimento, feitos com o auxílio de um osciloscópio digital, conectado ao computador pela porta RS 232. Na mesma figura também estão marcados os períodos de cinco oscilações, usadas para medir as freqüências naturais amortecidas  $f_{I\text{fix}}$  e  $f_{MS\text{fix}}$ , com o invólucro fixo e com a massa suspensa fixa, respectivamente. Foram considerados cinco ciclos em cada caso, para melhorar a precisão da leitura. Em lugar de usar um acelerômetro para obter as curvas de amortecimento, o sinal foi obtido a partir da força eletromotriz induzida nas bobinas, evitando-se assim o acréscimo de massas externas ao sistema. Estas medições foram feitas com o eixo do reator dinâmico na posição horizontal. Na Tab.(1) estão resumidas as principais características do reator dinâmico.

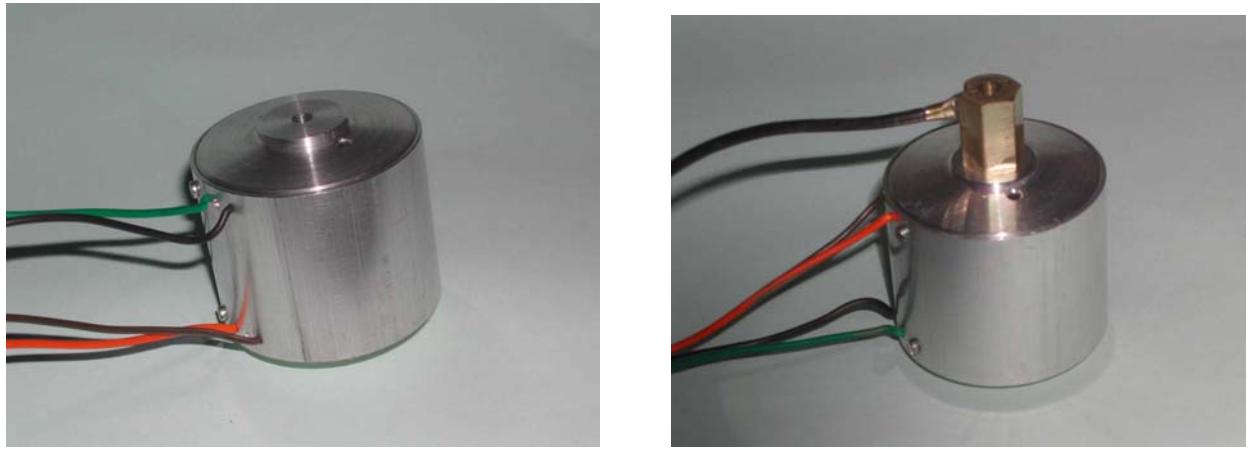


Figura 2. Reator dinâmico sem (esquerda) e com acelerômetro acoplado (direita)

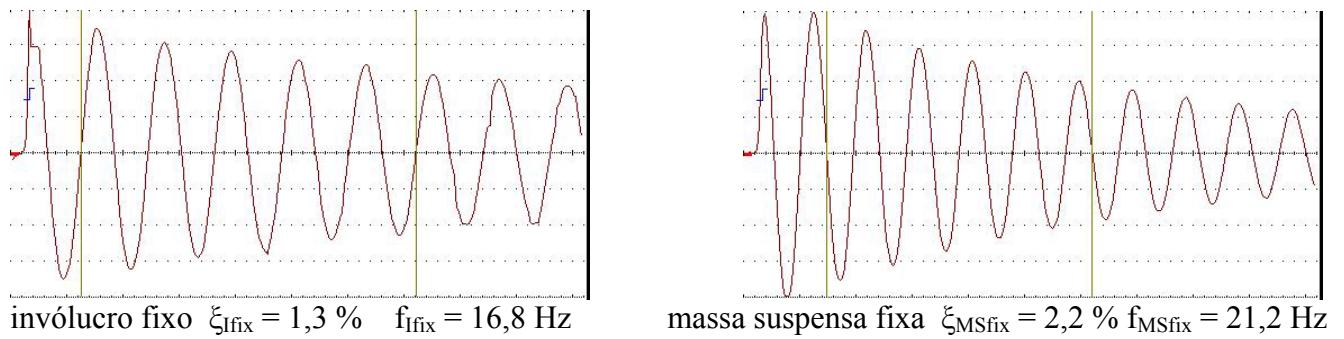


Figura 3. Oscilação livre amortecida da massa suspensa (esquerda) e do invólucro (direita)

Tabela 1. Características mais importantes do Reator Dinâmico

nº	item	característica	observações
1	massa total	270 gramas	excluindo cabos
2	massa do invólucro	106 gramas	idem
3	massa da massa suspensa	164 gramas	
4	dimensões	52,5mm x 50,3mm	altura x diâmetro
5	resistência das bobinas	6,7 $\Omega$	ligadas em série
6	auto indutância de cada bobina	0,20 mH	
7	força na bobina/ Ampère	4,4 N/A	pico de força/ corrente
8	corrente nominal na bobina	1,2 A <sub>rms</sub>	valor quadrático médio
9	corrente máxima na bobina	1,8 A <sub>rms</sub>	durante alguns minutos
10	corrente extrema na bobina	2,4 A <sub>rms</sub>	durante alguns segundos
11	força nominal na bobina	5,3 N	pico de força
12	freqüência natural com invólucro fixo	19,0 Hz	
13	freqüência natural com interior fixo	21,6 Hz	
14	amortecimento com invólucro fixo	1,3 %	
15	amortecimento com interior fixo	2,2 %	
16	freqüência de utilização	gama audível	
17	amplitude máxima de deslocamento	3 mm	pico a pico
18	temperatura externa admissível	100 °C	
19	furos de fixação rosqueados	3/16", 32fpp	M10 x 0,6 de um dos lados
20	posição de funcionamento		qualquer posição

### 3. APLICAÇÕES

#### 3.1 Uso Geral

O reator dinâmico pode ser facilmente convertido em uma mesa excitadora para uso geral, bastando fixar a massa interna e usar o invólucro como mesa excitadora. Esta fixação é feita por meio de uma haste de alumínio, com 7,5 mm de diâmetro, vinculada rigidamente a uma estrutura fixa por uma das extremidades e à massa suspensa pela outra, por meio de um prisioneiro M5x0,5. Desta forma, podem ser fixados pequenos objetos na outra tampa do invólucro, tais como acelerômetros para calibração, pequenos relés para teste de estabilidade vibratória, etc, conforme ilustrado na Fig (4), a qual mostra este arranjo durante a calibração de um acelerômetro, com o reator dinâmico transformado em mesa excitadora. A introdução da haste no reator dinâmico é possibilitada pela remoção da porca sextavada de uma das tampas do seu invólucro.

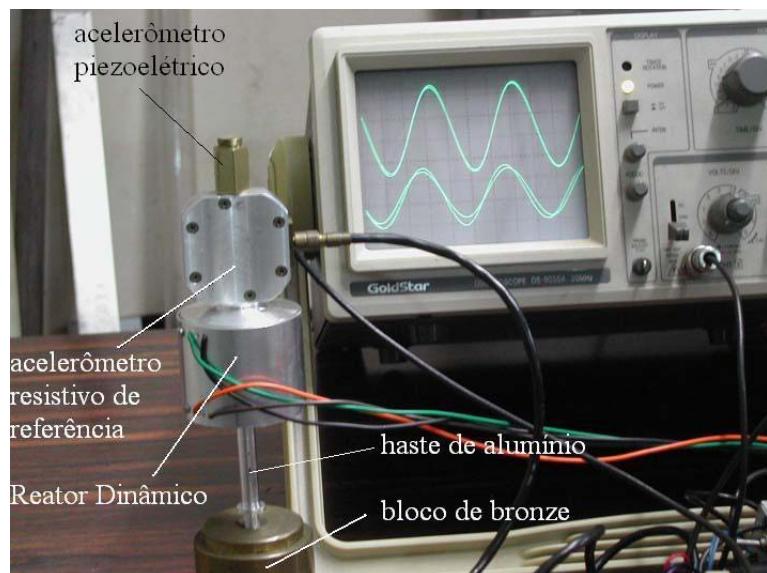


Figura 4. Uso do Reator Dinâmico como excitador de uso geral – calibrando um acelerômetro

Com este arranjo o reator dinâmico também pode ser usado para ilustrar aulas de física, de vibrações, de acústica, etc, dada a sua simplicidade operacional e as suas dimensões e massa reduzidas. Com efeito, um amplificador de 20 Watts de potência já é suficiente para acionar o reator e fazer uma variedade de demonstrações, como ilustrado na Fig. (5).

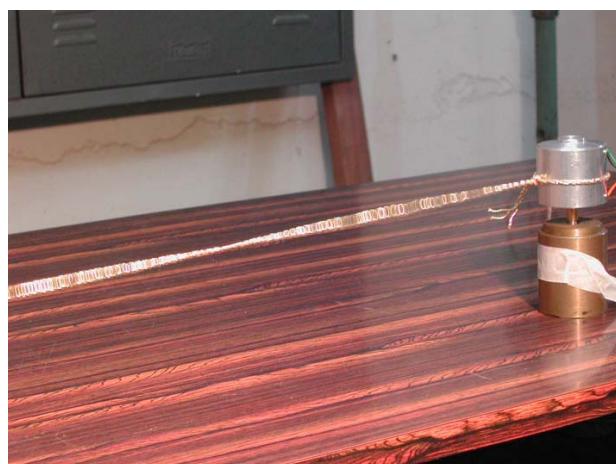


Figura 5. Uso do reator dinâmico como excitador de uso geral – produzindo onda estacionária

### 3.2 Excitação Estrutural

O reator dinâmico pode ser usado para determinar freqüências naturais de painéis, janelas, dutos de ar condicionado, componentes de veículos automotivos (Vasconcelos, 2001), etc. Para exemplificar este tipo de aplicação, o reator dinâmico foi fixado no centro de uma placa de madeira compensada com

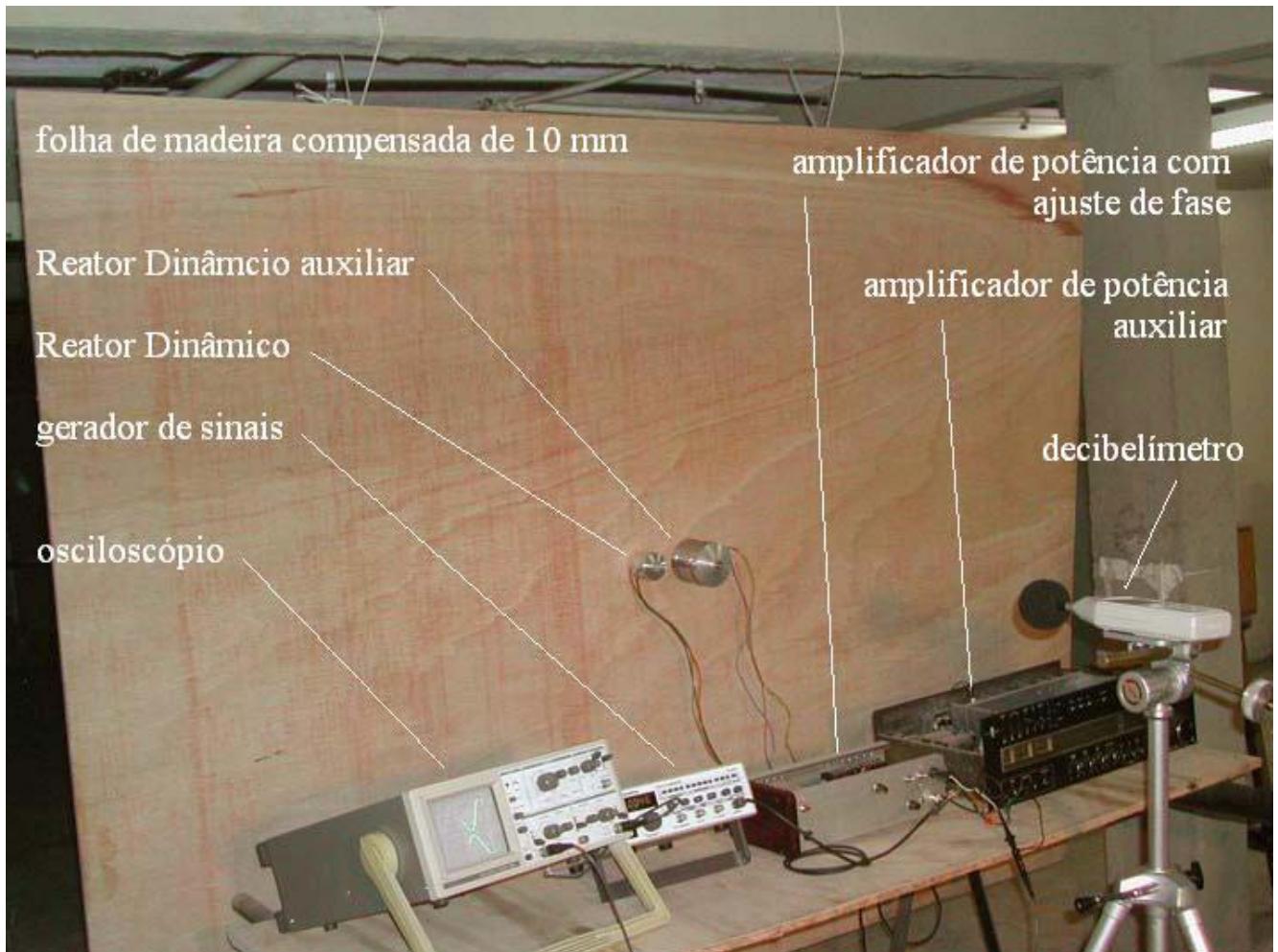


Figura 6. Montagem experimental para testar o desempenho do Reator Dinâmico

10 mm de espessura e medindo 1,6 m x 2,2 m, suspensa por meio de dois cordões, conforme ilustrado na Fig. (6). O reator dinâmico de que trata este artigo é o menor, o qual está ao lado de outro reator dinâmico maior. Sobre a mesa podem ser vistos, pela ordem: um osciloscópio, um gerador de sinais, um amplificador de potência para acionar o reator dinâmico menor e outro amplificador de potência, para acionar o reator dinâmico maior, o quê será abordado na próxima subseção. O reator dinâmico menor foi acionado por um sinal senoidal, com uma corrente de  $1,26 \text{ A}_{\text{rms}}$ , cuja freqüência foi ajustada para 46,2 Hz, de tal forma a coincidir com uma das freqüências naturais da placa de madeira. As medições do nível sonoro, a um metro de distância do centro da placa de madeira, com o decibelímetro montado no tripé em frente à mesa, indicaram os seguintes resultados: 90 dBc, com o reator dinâmico acionado, sendo 50 dBc de ruído de fundo.

### 3.3 Redução de uma Vibração Forçada

Para realizar este teste foi usado um reator dinâmico auxiliar, doravante denominado excitador auxiliar, do tipo descrito acima, mas com dimensões maiores, 0,800 kg de massa suspensa e 1,250 kg

de massa total. Este excitador auxiliar foi fixado a 10 cm do reator dinâmico, como pode ser visto no centro da Fig. (6), e acionado com um sinal senoidal de 64 Hz, por meio de um amplificador de potência auxiliar, mostrado na extremidade direita da mesa. A saída deste amplificador foi ajustada até ser obtido um ruído de 86 dBc, e o mesmo sinal foi então fornecido ao amplificador de potência usado para acionar o reator dinâmico, o qual foi ligado em oposição de fase em relação ao excitador auxiliar. Como normalmente existe uma diferença de fase entre as saídas de amplificadores, o excitador auxiliar e o reator dinâmico não foram acionados exatamente em oposição de fase mas, mesmo assim, o ruído produzido na placa de madeira baixou cerca de 10 dBc, apenas com um ajuste preliminar da amplitude do sinal fornecido ao reator dinâmico. Por meio do corretor de fase ativo do amplificador do reator dinâmico, a diferença de fase foi ajustada, de tal forma que, com um novo reajuste da amplitude do acionamento do reator dinâmico, o nível de ruído foi reduzido, de 86 dBc para 56 dBc, sendo 48 dBc o ruído de fundo.

### 3.4 Excitação de uma Parede

Para avaliar o limite de capacidade do reator dinâmico, o mesmo foi fixado a uma parede de uma camada de tijolos furados, conforme ilustrado na Fig. (7). Esta fixação foi feita por meio de um parafuso prisioneiro, engastado na parede com o auxílio de uma bucha de plástico. O reator dinâmico foi então acionado com um sinal senoidal, cuja freqüência foi variada, ocorrendo uma ressonância em 53 Hz. Então a corrente fornecida ao reator dinâmico foi aumentada até ser atingido um nível de ruído de 86 dBc, contra um ruído de fundo de 52 dBc, medidos com um decibelímetro posicionado a um metro da parede. Este nível de ruído só pôde ser obtido durante alguns testes de curta duração, menos de um minuto de cada vez, pois a corrente fornecida ao reator dinâmico atingiu 2,5 A<sub>rms</sub>, a qual poderia danificar as suas bobinas se os testes fossem mais demorados. Para a realização deste teste foi empregado um decibelímetro, posicionado a um metro da parede, um amplificador de potência estereofônico, com os dois canais recebendo o mesmo sinal e cada canal alimentando uma das bobinas do reator dinâmico, um gerador de sinais e um multímetro, os quais podem ser vistos na parte inferior da Fig. (8). A leitura no decibelímetro não se refere à medição acima.

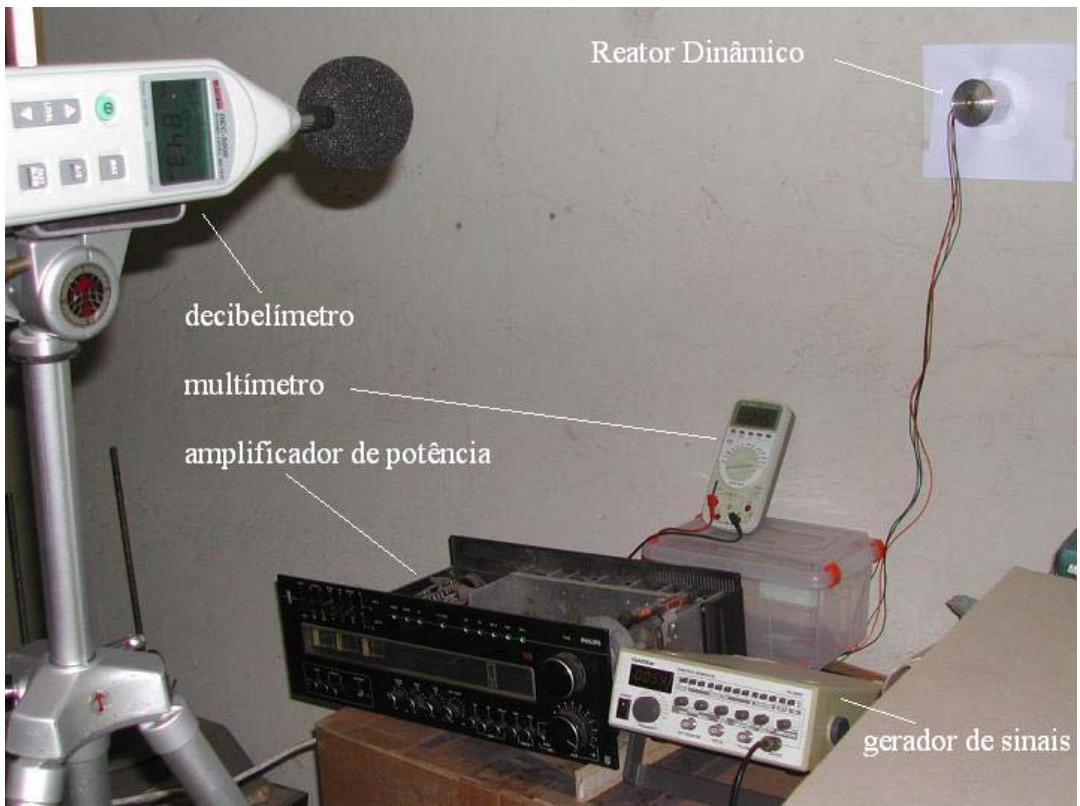


Figura 7. Reator dinâmico levado ao seu limite

### **3.5 Resposta de Freqüência**

O reator dinâmico, montado da forma ilustrada na Fig. (7), foi alimentado com um sinal musical, tendo demonstrado excelente desempenho na reprodução de óperas, concertos para violino, etc, com um som puro e suave, mesmo acima de 80 dBc, o quê sugere uma capacidade de reproduzir toda a gama audível.

## **4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

As seguintes conclusões podem ser tiradas do que foi exposto acima: a) a reação a uma força periódica, aplicada a uma massa elasticamente suspensa em um invólucro solidário com uma estrutura, pode produzir uma quantidade substancial de vibração na estrutura; b) o reator dinâmico demonstrou ser eficaz para produzir vibrações em uma variedade de componentes estruturais, podendo atuar como controlador ativo de vibrações; c) com uma construção compacta e robusta, além da ausência de peças móveis externas, o reator dinâmico é versátil e fácil de usar, particularmente para produzir vibrações de baixa freqüência; d) a grande relação força / massa do reator dinâmico é particularmente vantajosa para testar estruturas leves, e) mediante uma pequena adaptação o reator dinâmico pode ser convertido em uma mesa excitadora para uso geral.

Algumas sugestões podem ser feitas, a partir dos resultados descritos acima: a) empregar os mesmos princípios usados no reator dinâmico, para desenvolver um dispositivo semelhante mas de construção mais simples e com menor custo de fabricação; b) construir reatores dinâmicos de diferentes dimensões e com diferentes massas, de acordo com necessidades específicas; c) desenvolver sistemas de controle ativo de vibrações, usando reatores dinâmicos do tipo apresentado neste trabalho.

## **5. REFERÊNCIAS**

- Thomson, W. T., 1978 “Teoria da Vibração com Aplicação”, Interciênciac, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Vasconcelos, H. F., 1996 “Vibrations electromagnetic micro excitors using rare earth magnets”, Proceedings of the 14th International Workshop on Rare-Earth Magnets and Their Applications, Vol. 1, São Paulo, SP, Brasil, pp 607-616.
- Vasconcelos, H. F., 1981 “Reator Dinâmico Fechado para Determinar Freqüências Naturais em Componentes de Veículos Automotivos”, Anais do VI Simpósio Brasileiro de Acústica Veicular, São Bernardo do Campo, SP, Brasil, pp. 113-119.

## **6. DIREITOS AUTORAIS**

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material exposto neste trabalho.

# DYNAMIC REACTOR FOR THE ACTIVE CONTROL OF MECHANICAL VIBRATIONS

**Halei Fagundes de Vasconcelos**

Department of Physics – Federal University of Paraiba

P. O. Box 5008

58059 – 970 João Pessoa, PB, BRAZIL

<antares@fisica.ufpb.br>

**Abstract** The active control of low frequency vibrations in mechanical structures, such as: air ducts, windows, appliance cabinets, etc, requires the application of counteracting forces at selected points of the oscillating structure. This counteracting force can be produced by the dynamic reaction to electromagnetic forces imposed upon a mass elastically suspended into an enclosure, which is rigidly clamped to the oscillating structure. The elastic suspension must allow for fairly large oscillating displacements of the suspended mass inside the enclosure, thus producing low large accelerations upon the application of electric current to a pair of coils which are fixed to the enclosure. The forces produced by those accelerations may react to the oscillations which are transmitted to the enclosure by the vibrating structure, reducing its effect. In this investigation a closed electromagnetic micro-exciter, with a reactive mass in its interior, capable of delivering fairly large reactive forces with large elastic displacements of the reactive mass, in the range from zero to a few thousands of Hertz, is presented and a few practical application examples are described.

**Keywords.** *Dynamic reaction, vibrations, electromagnetic, resonance.*