



## PROJETO DE UM EXCITADOR ELETROMAGNÉTICO PARA ANÁLISE MODAL EM ROTORES

**Márcio Feres Bessa<sup>1</sup>** - [bess@uninet.com.br](mailto:bess@uninet.com.br)

Universidade Federal do Rio de Janeiro – PEM/COPPE/UFRJ  
Laboratório de Acústica e Vibrações - LAVI  
C.P. 68503, CEP 21945-970, Rio de Janeiro - BRASIL

**Moisés Zindeluk<sup>1</sup>** - [moyses@serv.com.ufrj.br](mailto:moyses@serv.com.ufrj.br)

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Renato de Oliveira Rocha** - [renato@cepel.br](mailto:renato@cepel.br)

ACME - Centro de Pesquisa em Energia Elétrica – CEPPEL/ELETOBRÁS  
C.P. 68007, CEP 21944-970, Rio de Janeiro, BRASIL

**José Andrés Santisteban Larrea** – [jasl@mec.uff.br](mailto:jasl@mec.uff.br)

Universidade Federal Fluminense – PGMEC/UFF  
Rua Passo da Pátria, 156 , São Domingos, Niterói, RJ – BRASIL  
CEP 24210-240

**Resumo:** *A identificação modal experimental em um sistema rotativo do tipo eixo-disco-mancais, objetivando a identificação de parâmetros modais para diferentes velocidades de rotação, encontra um de seus maiores desafios na excitação do rotor ao longo de toda a sua trajetória circular. Partindo-se do mesmo princípio utilizado em mancais magnéticos, apresenta-se o projeto de um excitador eletromagnético a ser montado em um protótipo de máquina rotativa vertical, que gere uma força giratória assíncrona, visando um estudo mais detalhado deste tipo de problema. O modelo analítico, bem como os primeiros resultados numérico e experimental envolvendo a análise do efeito da força girante, são apresentados.*

**Palavras chave:** *Máquinas Rotativas, Excitador Eletromagnético, Força Girante*

### 1. INTRODUÇÃO

Sistemas rotativos são bastante comuns em diversos processos industriais associados a turbinas, geradores, centrífugas, compressores, etc. Armazenando energia cinética, esses sistemas, ao transformarem parte desta energia em trabalho, invariavelmente produzem vibrações indesejáveis ao processo de operação por comprometerem a performance e pôr em risco a vida útil do equipamento. Além dos estragos em grandes proporções que um acidente com máquina dessa natureza pode causar, uma parada não planejada do equipamento pode apresentar um custo extremamente elevado (Weber, 1987). Neste sentido, o conhecimento e monitoração destas máquinas permitem não só melhorias no seu projeto, como também, com base numa observação contínua de seu comportamento, a otimização do processo de manutenção, baseada na previsão de falhas, ou seja, de quando o dano existente pode vir a causar problema, possibilitando uma retirada de operação de forma planejada.

Independentemente do tipo do equipamento, a análise é feita sempre com base no mesmo formalismo teórico e técnicas experimentais, tendo sido a modelagem de sistemas rotativos alvo de inúmeras pesquisas em engenharia, devido à sua complexidade, envolvendo a dependência temporal, dependência da velocidade de operação, número de graus de liberdade (gdl), anti-simetria da matriz giroscópica, inclusão de amortecimento, etc. Some-se a isso a existência de forças de excitação eletromagnéticas, por sua natureza não-lineares, como pode ser observado em geradores de uma usina hidro ou termoelétrica. Desta forma, o estudo de sistemas deste tipo leva a formação de mão-de-obra especializada que permita às indústrias um mínimo de competência na operação e manutenção de suas máquinas.

Neste sentido, a Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) juntamente com o Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (CEPEL/ELETROBRÁS), vêm atuando nesta área realizando estudos/análises neste tipo de equipamento, sendo os mesmos parte de um projeto mais abrangente envolvendo monitoração, diagnóstico e controle ativo de vibrações em máquinas rotativas. Dentro deste enfoque, o presente trabalho apresenta o projeto de um excitador eletromagnético, visando um estudo mais detalhado desse tipo de problema em protótipos de máquinas rotativas, iniciando-se por um vertical, constituído de um eixo flexível de 8mm e de um disco rígido de 110 mm de diâmetro, podendo ser suportado por mancais hidrodinâmicos ou de rolamento. O excitador consiste de um conjunto de 4 bobinas independentes diametralmente opostas e em direções ortogonais, que são posicionadas ao redor do rotor gerando forças harmônicas, cuja resultante é uma força girante com uma frequência independente da frequência de rotação do rotor. Um circuito eletrônico permite o controle das amplitudes, bem como da frequência das forças. O rotor, por sua vez, é um disco composto por alumínio e chapas de aço silício empilhadas, de forma a permitir que o campo gerado nas bobinas excite o sistema com reduzido efeito de correntes parasitas.

São apresentados também o modelo analisado e os primeiros resultados numéricos obtidos no projeto do excitador, envolvendo o estudo do caráter girante da força de excitação.

## **2. MODELO**

Na análise de um sistema estrutural, o seu comportamento dinâmico é normalmente descrito por suas propriedades físicas associadas à inércia, rigidez e amortecimento, pelas forças externas atuantes, bem como pelas condições de contorno que particularizam o problema.

A definição destas propriedades pode ser feita por meio de um Modelo Espacial, definido pelo sistema de equações diferenciais que o descrevem, tomado em função do tempo, ou com a utilização de um Modelo Modal, onde a caracterização das propriedades dinâmicas é feita em função da frequência. Nesta última análise, busca-se a obtenção dos autopares (autovalores e autovetores) do modelo analítico ou, no processo experimental, a identificação das frequências naturais, modos de vibração e fator de amortecimento da estrutura. Além disso, os parâmetros modais obtidos experimentalmente podem ser utilizados para fazer o ajuste do modelo analítico ou numérico, bem como previsões de resposta forçada.

A análise modal tem sido largamente utilizada na identificação de parâmetros modais em sistemas elásticos não rotativos. No entanto, na aplicação em máquinas rotativas, há que se considerar algumas importantes particularidades, como por exemplo a não simetria presente no sistema de matrizes devido à existência do efeito giroscópico, a dependência dos parâmetros modais em relação à velocidade de rotação e, no caso experimental, a necessidade de se excitar o rotor e medir a resposta durante a rotação.

Problemas desta natureza, em geral, consideram como excitação as forças de desbalanceamento (síncronas com a rotação) ou forças de excitação externas agindo numa direção pré-determinada (síncronas ou não). A excitação por impacto, via martelo, por exemplo, embora bastante comum, em sistemas rotativos causa uma indesejável e não mensurável força tangencial, além de possuir limitações de precisão e repetibilidade (Joh&Lee, 1993). No presente estudo, propõe-se a aplicação da excitação através de forças eletromagnéticas harmônicas geradas por quatro bobinas

diametralmente opostas e em direções ortogonais, montadas ao redor do rotor, visto ser esta a forma mais adequada de excitação para um sistema com tais características. Estas forças, agindo simultaneamente, dão origem a uma força resultante girante, a qual age ao longo de toda trajetória circular, com uma frequência independente da frequência de rotação e cujo sentido de “giro” pode ser o mesmo ou contrário ao da rotação, permitindo assim, a excitação controlada de modos diretos ou retrógrados.

O modelo analisado toma por base o protótipo de uma máquina rotativa vertical apresentado na Fig. (1), cujas características foram anteriormente descritas, construído em parceria entre a COPPE/UFRJ (Murta, 2000) e o CEPEL/ELETROBRÁS.

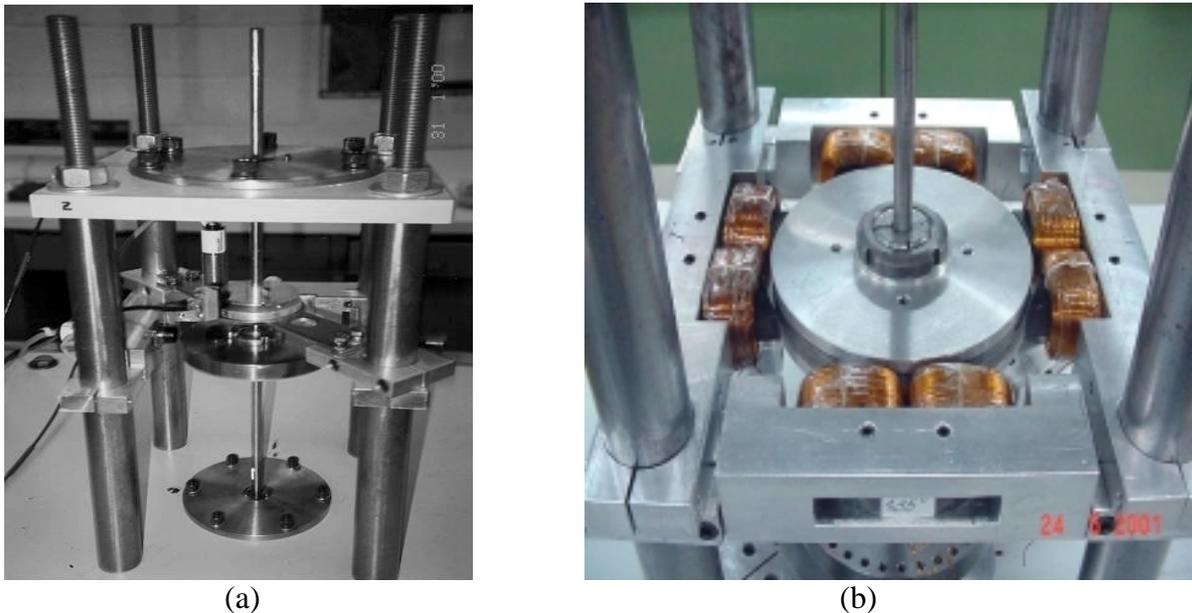


Figura 1 – (a) Protótipo da máquina rotativa vertical; (b) Detalhe do protótipo com o disco e bobinas montadas

O modelo consiste num sistema rotativo, tratado com elementos finitos com 4 graus de liberdade (gdl) por nó, amortecido (amortecimento viscoso), com excitação externa sem contato. Na determinação das equações de movimento, cada um de seus componentes é tratado separadamente. Assim o rotor é considerado como um disco rígido, caracterizado exclusivamente pela sua energia cinética, podendo transladar em duas direções e girar em três direções. O eixo é um componente elástico, caracterizado pelas suas energias cinética e potencial, que permite movimento de rotação e translação em torno de dois eixos, além de possuir uma rotação própria em torno do seu eixo longitudinal. Sua energia potencial é determinada na forma de energia de deformação elástica, a qual pode se compor de uma parcela devida à flexão e outra devida ao cisalhamento, compondo, neste caso, um modelo de viga de Timoshenko. Os mancais, por sua vez, são elementos de suporte linearizados com coeficientes de rigidez e amortecimento. A excitação do sistema é feita por meio de forças eletromagnéticas que, num primeiro instante, será considerada na sua forma básica dada por (Bessa, 1997):

$$F = -\frac{1}{4} \mu_0 S N^2 \frac{i^2}{x^2} \quad (1)$$

onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do ar ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m), S a área eficaz atravessada pelo fluxo magnético, N o número de espiras de cada bobina,  $i$  a corrente e  $x$  o entreferro (“gap”). Assim o sistema de equações de movimento é descrito como:

$$[M]\{\ddot{q}(t)\} + [C + \Omega G]\{\dot{q}(t)\} + [K]\{q(t)\} = \{F(t)\} \quad (2)$$

onde  $\{q(t)\}$  é o vetor de coordenadas generalizadas que representa os deslocamentos translacionais e rotacionais do sistema,  $\Omega$  é a velocidade de rotação própria do eixo (ou “spin”) e os demais termos são as matrizes de inércia  $[M]$ , de amortecimento  $[C]$ , giroscópica  $[G]$  e de rigidez  $[K]$ , além do vetor de forças  $\{F(t)\}$ . Transformando esta equação, com a utilização de variáveis de estado, a mesma pode ser escrita como:

$$[\overline{M}]\{\dot{\Delta}(t)\} - [\overline{K}]\{\Delta(t)\} = [I]\{\overline{F}(t)\} \quad (3)$$

sendo  $\{\Delta(t)\}^T = \{\dot{q}(t) \quad q(t)\}$  o vetor de estado, e  $[\overline{M}]$ ,  $[\overline{K}]$  e  $\{\overline{F}(t)\}$ , respectivamente, composições da matriz de inércia, das matrizes de amortecimento, giroscópica e de rigidez e do vetor de forças. Considere-se inicialmente a solução da parcela homogênea da Eq.(3) ou seja, para o caso em que não existam excitações externas, conhecido como vibração livre, adotando-se, para a mesma, uma solução do tipo:

$$\{\Delta(t)\} = \{U\}\{\eta(t)\} \quad (4)$$

onde  $\{U\}$  é o vetor posição do sistema e  $\{\eta(t)\}$  é uma função temporal que define a contribuição de cada modo na variação do estado do sistema. Fisicamente isso significa que todas as coordenadas possuem movimentos síncronos e que a configuração do sistema não muda sua forma durante o movimento, mas apenas a sua amplitude (Meirovitch, 1967). Adotando-se então  $\{\eta(t)\}$  como uma função exponencial (auto-função) de forma que:

$$\{\Delta(t)\} = \{U\} e^{\lambda t} \quad (5)$$

e substituindo esta forma de solução separada na parcela homogênea da equação de estado (Eq. (3)), chega-se a um problema de autovalor, cuja solução seriam as frequências naturais e amortecimentos modais (autovalores) e os respectivos modos de vibração (autovetores) do sistema (Rocha, 1992; Lalanne&Ferraris, 1998; Ewins, 1984).

Admitindo que as matrizes da Eq.(3) sejam simétricas e possuam elementos reais, os autovetores serão linearmente independentes e ortogonais.

$$\{U\}_r^T [\overline{M}] \{U\}_s = 0, \quad \forall r \neq s \quad (6)$$

podendo-se associar os mesmos aos modos naturais de vibração do sistema ( $r$  e  $s$  modos do sistema). Este tipo de problema é dito auto-adjunto, empregando-se esta propriedade na normalização dos autovetores calculados de forma que se tenha:

$$\{U\}_r^T [\overline{M}] \{U\}_s = [I] \quad (7)$$

$$\{U\}_r^T [\overline{K}] \{U\}_s = [\Lambda]$$

onde  $[\Lambda]$  é uma matriz diagonal formada pelas frequências naturais. Este é o caso que ocorre com sistemas elásticos não rotativos. No entanto, para sistemas rotativos, devido à existência do efeito giroscópico, nem todas as matrizes são simétricas e a propriedade de ortogonalidade não se verifica da forma simples dada pela Eq.(6). Neste caso, os autovetores obtidos serão complexos conjugados, sendo estes, ainda, linearmente independentes, mas não ortogonais. Isso significa que os autovetores não podem mais ser diretamente associados aos modos de vibração (reais) do sistema, mas sim que

estes últimos são combinações de conjuntos de autovetores, passando a propriedade de ortogonalidade ser descrita pela relação:

$$\{V\}_s^T [\overline{M}] \{U\}_r = 0, \quad \forall r \neq s \quad (8)$$

significando que o autovetor  $\{U\}_r$  do problema original é  $[\overline{M}]$ -ortogonal ao autovetor  $\{V\}_s$  do problema adjunto, para  $r \neq s$ , sendo os autovetores  $\{V\}$  e  $\{U\}$  ditos recíprocos ou autovetores à esquerda e à direita. A normalização dos autovetores é feita agora a partir das relações:

$$\begin{aligned} \{V\}^T [\overline{M}] \{U\} &= [I] \\ \{V\}^T [\overline{K}] \{U\} &= [\Lambda] \end{aligned} \quad (9)$$

Neste caso, como nem todas as matrizes são simétricas, deve-se resolver ambos os problemas, o original e o adjunto, sendo problemas deste tipo chamados não auto-adjuntos.

No caso da vibração forçada, como mencionado anteriormente, a excitação do sistema se dará por meio de forças eletromagnéticas harmônicas e assíncronas, caracterizando um caso de excitação sem contato. Com base ainda na Eq.(1), pode-se perceber que a excitação também é função da posição do sistema, tendo-se uma não-linearidade a ser considerada na resolução da equação do problema (Eq.(2)). Sendo o sistema aberto, isto é sem controle, fisicamente a inclusão desta força não linear caracteriza um problema de vibração auto-excitada, pois a força de excitação, que causa a vibração, não é função apenas do tempo, mas é também controlada pelo movimento. Neste caso, o estudo do problema envolve também o estudo desta não linearidade. A seguir é apresentada uma análise mais detalhada do comportamento da força de excitação.

### 3. FORÇA DE EXCITAÇÃO

Para gerar uma força de excitação agindo ao longo de toda trajetória orbital do rotor, faz-se necessário defasar a força magnética em cada bobina, de modo a criar um “desequilíbrio” no campo magnético ao redor do rotor. Objetivando analisar apenas o caráter girante da força de excitação, considere-se a expressão da força eletromagnética, mostrada na Eq. (1), e admita-se como pequenas as variações do gap. Sendo os demais termos constantes, pode-se escrever que  $F \propto i^2$ . Desta forma, para uma corrente do tipo  $i = i_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t + \theta)$ , tem-se a força dada por (Santisteban, 1999):

$$F = \overline{F} + \frac{\overline{F}}{2} \cos(2\omega t + \gamma) \quad \left( \gamma = 0; \frac{\pi}{2}; \pi; \frac{3\pi}{2} \right) \quad (10)$$

onde se percebe que a força possui um termo médio ( $\overline{F}$ ) e outro oscilante ( $\frac{\overline{F}}{2} \cos(2\omega t + \gamma)$ ), cuja frequência é duas vezes a frequência da corrente de excitação. Para a corrente harmônica admitida, após algumas manipulações, a expressão da força pode ser reescrita como:

$$F \propto \frac{i^2}{2} - \frac{i^2}{2} \cos(2\omega t + \gamma)$$

Este sistema de forças, agindo simultaneamente segundo duas direções ortogonais e quatro fases distintas, dá origem a uma força resultante girante que irá excitar o sistema. Para inverter o sentido do “giro”, visando excitar os modos retrógrados, é feita uma inversão no circuito elétrico de alimentação das bobinas, de forma que a resultante do sistema de forças gire em sentido contrário.

A criação do campo magnético, com a conseqüente geração da força de excitação, é feita por um circuito eletrônico, descrito a seguir.

#### 4. PROJETO

O sistema é constituído de quatro bobinas, cujo núcleo em “U”, com seção de 20x10mm, é formado por lâminas de aço silício revestidas, eletricamente isoladas entre si, de forma a aumentar a eficiência das mesmas. Cada núcleo terá dois carretéis em suas pernas, ligados em série, totalizando 960 espiras (fio AWG24), por pólo. Estas bobinas são montadas ao redor do rotor de forma a garantir um gap inicial de 2mm no raio, podendo chegar a uma variação máxima de trabalho de 1mm. Visando manter um valor de gap constante no ângulo coberto pela bobina, as extremidades do núcleo foram usinadas, como pode ser visto na Fig. (2).

O rotor é um disco rígido de 110mm de diâmetro, cujo corpo é um carretel bi-partido feito em alumínio, com objetivo de evitar que o fluxo magnético gerado nas bobinas passe pelo eixo. Completam o disco, preenchendo o carretel, anéis de chapa de aço silício revestidos e empilhados (Fig. (2)), de forma a fechar o circuito magnético com as bobinas e reduzir os efeitos causados por correntes parasitas. O empilhamento dos anéis possui altura igual à largura do núcleo da bobina, ou seja, 10mm.

Para a defasagem das forças magnéticas nas bobinas é utilizado um circuito eletrônico composto por três partes: placa geradora de sinais, circuito comparador e circuito de potência.

A placa geradora de sinais é uma placa de circuito impresso feita especialmente para este fim, que além de gerar os sinais harmônicos de corrente que vão alimentar as bobinas, garante a defasagem entre os mesmos. Nessa placa, ainda é possível controlar a frequência do sinal de todo o conjunto, bem como a amplitude de corrente em cada bobina independentemente.

O circuito comparador recebe o sinal de referência da placa geradora de sinais e compara com o sinal real medido em cada bobina, fazendo o ajuste necessário (Mendes, 1999).

O circuito de potência, é formado por conjuntos de dois “mosfets” que fazem o chaveamento da corrente dos semi-ciclos positivo e negativo. Os “fets” são alimentados por uma fonte externa e, para evitar problemas de sobre-tensão ou corrente nos mesmos, são usados varistores que funcionam como “pára-raios”, protegendo os “fets” para níveis de tensão e/ou corrente acima de um determinado valor. Ainda, no circuito de potência, existem sensores de efeito Hall que dão retorno, para o circuito comparador, do sinal real de cada bobina. A saída destes sensores dá um valor de corrente a partir da variação do campo magnético no sensor. A Fig. (3) mostra uma foto do circuito eletrônico.



Figura 2 – Disco e bobina

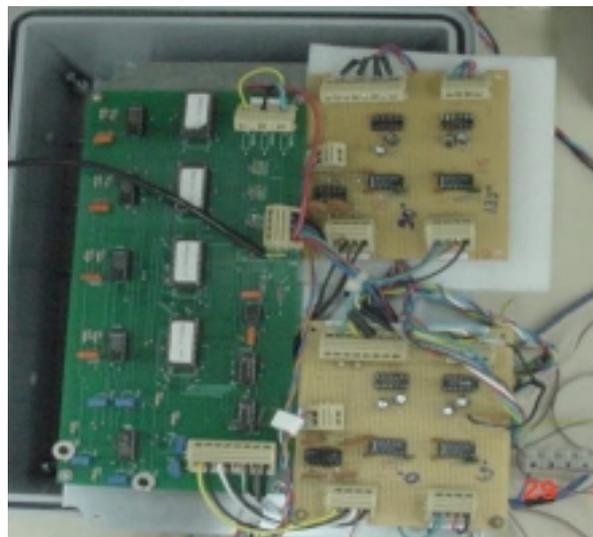


Figura 3 – Circuito eletrônico

## 5. ANÁLISE NUMÉRICA

Foi desenvolvida a modelagem numérica do protótipo da máquina rotativa (Fig. (1)), utilizando-se o programa computacional baseado no método de elementos finitos desenvolvido por Rocha, 1992, denominado ROTMEF<sup>®</sup>, o qual permite o cálculo da resposta natural ou forçada de rotores.

O modelo consiste de um sistema eixo-disco-mancais, com o disco posicionado no centro do vão (nós 7 à 9), sendo o eixo suportado por dois mancais radiais (nós 4 e 12), com um mesmo valor de rigidez para cada direção, e ainda um de escora (nó 3) (Fig. (4)). Os eixos coordenados estão dispostos de forma que o eixo y se alinha com a direção longitudinal da árvore, sendo os eixos x e z transversais.

Inicialmente, determinou-se o Diagrama de Campbell (Fig. (5)) do modelo, para se conhecerem as frequências naturais do sistema em função de sua rotação, onde se pode perceber que as frequências naturais para o primeiro par de modos direto e retrógrado são coincidentes, visto o efeito giroscópico ser muito pouco significativo para este primeiro par, com o disco colocado na posição descrita.

Em seguida, objetivando um estudo envolvendo apenas o caráter girante da força de excitação, admitindo um gap de 2mm, aplicou-se o carregamento harmônico exercido pelas forças de atração geradas nas bobinas nas duas direções, com uma frequência igual a 45,83 Hz, a qual corresponde à frequência fundamental do sistema. Ainda, com intuito de destacar esta característica da força eletromagnética, considerou-se o eixo sem rotação (0 rpm), no sentido de se obter uma resposta apenas aos efeitos do carregamento. Desta forma, embora sem rotação, o eixo apresenta um movimento orbital, o que bem caracteriza o aspecto girante da resultante das forças aplicadas, apresentando amplitudes da ordem de  $10^{-4}$  m, como pode ser visto nas Figuras (6) e (7). Vale mencionar que, embora apresentado na saídas gráficas na posição horizontal (Fig. (4)) e em perspectiva (Fig. (7)), o modelo foi feito para um eixo vertical, em acordo com o protótipo a ser ensaiado. Ainda, deve ser ressaltado que, embora a órbita mostrada nestas figuras apresente-se como sendo circular, tal fato se dá em função de ter-se admitido um mesmo valor de rigidez para as duas direções do mancal, como anteriormente mencionado, não podendo desta forma ser associado a um caso onde os mancais sejam hidrodinâmicos, possibilidade de montagem esta também permitida pelo protótipo analisado. Também nas futuras aplicações a máquinas de eixo horizontal, prevê-se maior assimetria de comportamento.

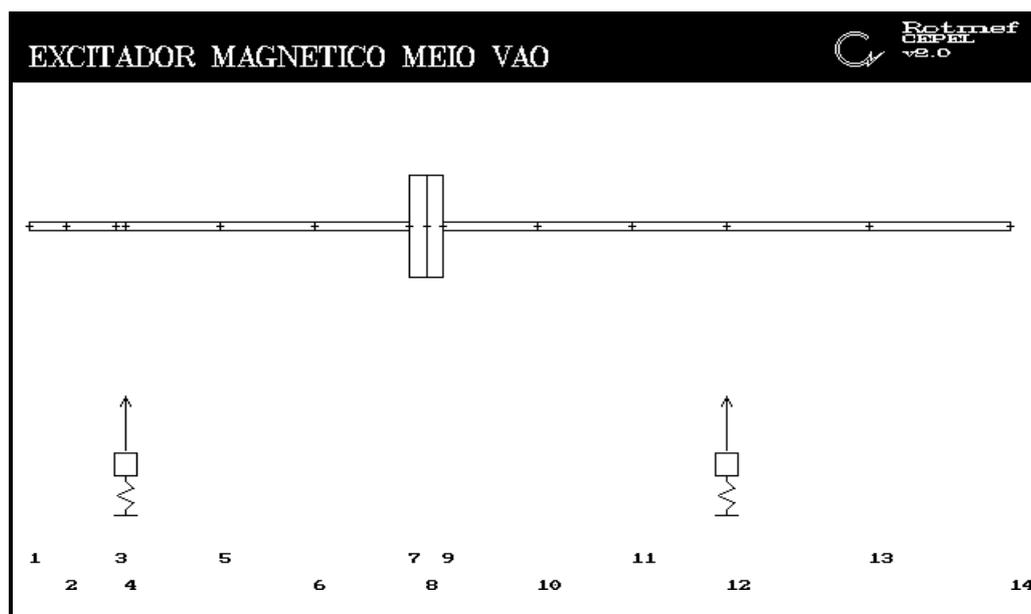


Figura 4 – Modelo em Elementos Finitos

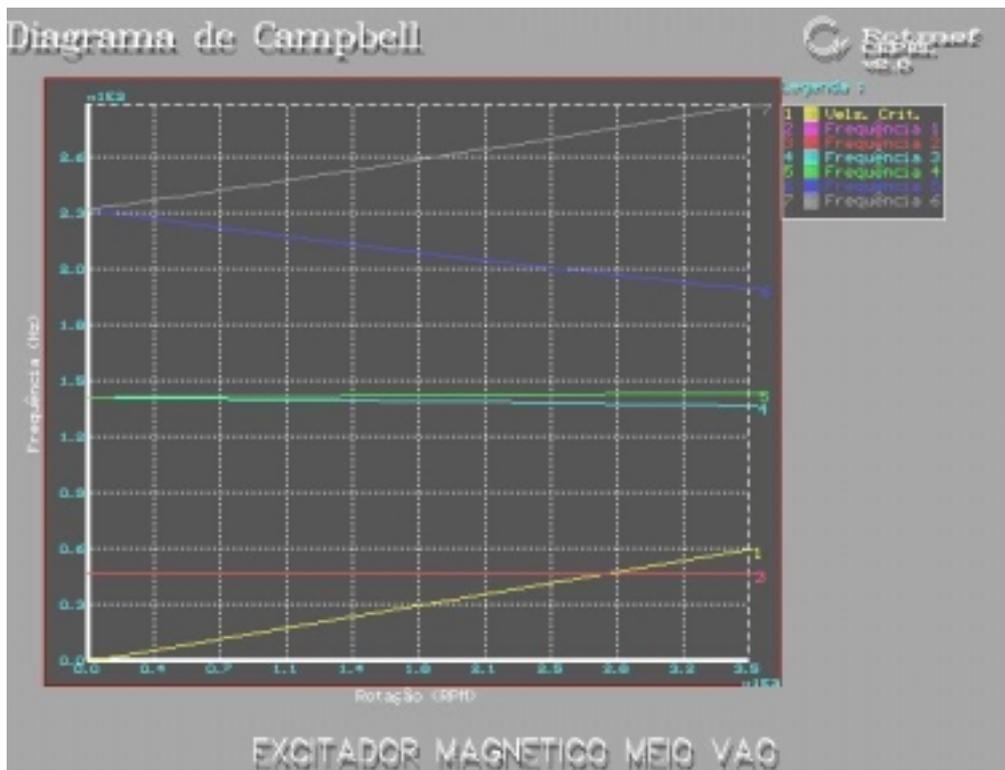


Figura 5 – Diagrama de Campbell

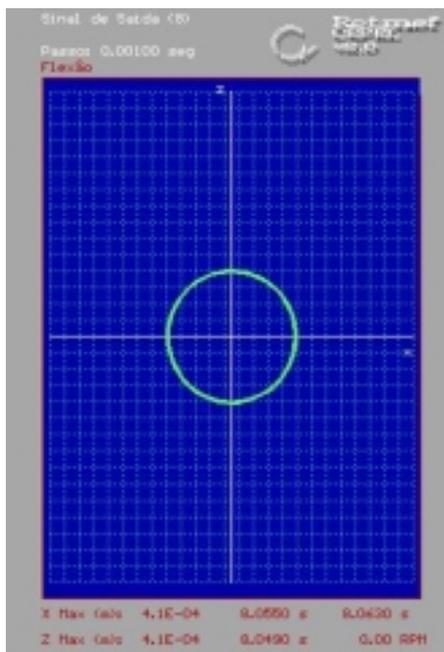


Figura 6 – Órbita do eixo (0 rpm)

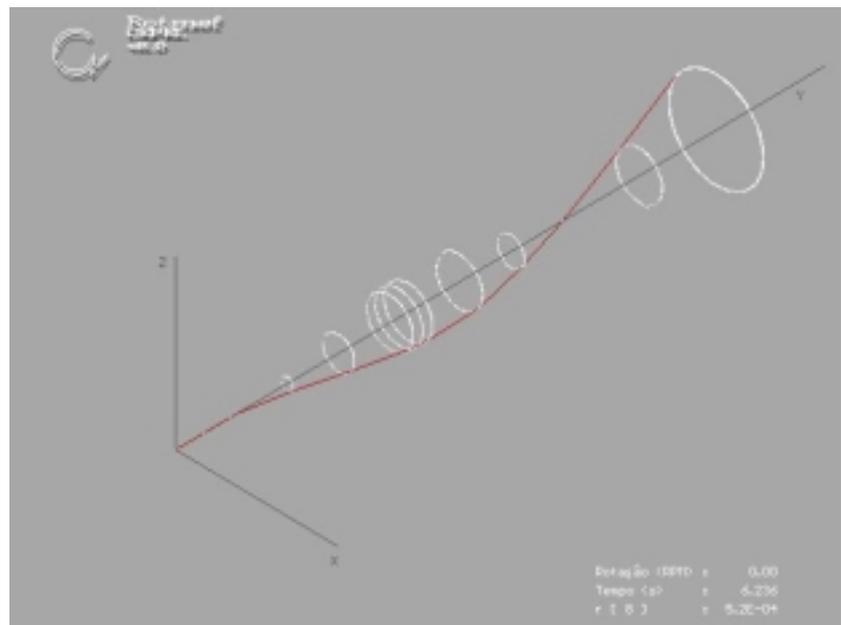


Figura 7– Sistema submetido apenas à excitação eletromagnética (0 rpm)

Tendo em vista o caráter não linear da força eletromagnética, vale lembrar que, na prática, com um deslocamento da ordem de 0,5mm como observado, o gap para a bobina atratora passaria de 2mm para 1,5mm, o que corresponde a um aumento considerável na força de excitação, ocasionando um deslocamento maior do eixo. Neste sentido, para evitar que o rotor toque nas bobinas, no experimento é usado um limitador de amplitude, posicionado no eixo, próximo ao disco, de forma a limitar a amplitude de deslocamento em 1mm no raio. Na realização dos experimentos, serão utilizados sensores óticos cuja resolução é da ordem de  $10^{-6}$  m. Desta forma,

uma opção seria a de se trabalhar com um valor mínimo de corrente capaz de gerar uma amplitude de força que perturbe o sistema, de tal forma que o deslocamento do eixo seja pequeno, podendo-se assim trabalhar num trecho de deslocamento considerado “linear”, sendo, neste caso, a amplitude da força de excitação apenas função da corrente. Para serviços mais severos, terá necessariamente que ser adotado, para as simulações e o controle, um modelo não linear.

Ainda no sentido de validar o caráter girante da força de excitação, a Fig. (8) apresenta um primeiro resultado experimental do sistema sem rotação (0 rpm), montado com a utilização de mancais de rolamento, submetido à excitação rotativa. Nota-se que, assim como demonstrado na análise numérica, embora sem rotação, o sistema apresenta um movimento orbital, devido apenas à ação do carregamento.

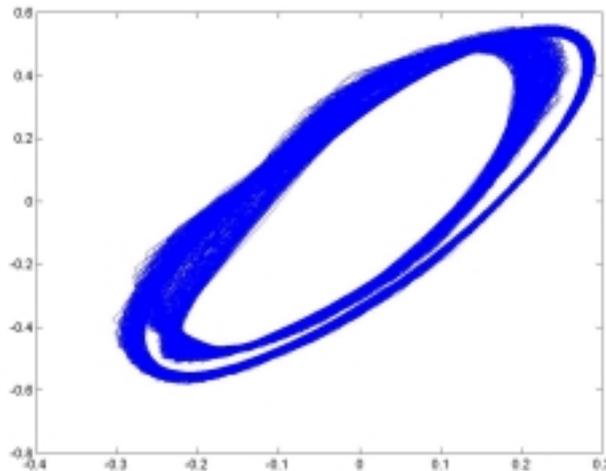


Figura 8 – Sistema submetido apenas à excitação eletromagnética (0 rpm)  
(Resultado experimental)

## 6. CONCLUSÕES

Perturbações causadas pela criação de campos magnéticos ao redor do rotor são comuns em alguns equipamentos rotativos, como por exemplo motores e geradores elétricos e devem ser consideradas na análise dos mesmos. Neste sentido, a simulação numérica e experimental deste fenômeno mostra-se uma ferramenta bastante útil por possibilitar um melhor entendimento deste tipo de sistema, permitindo a implementação de seu projeto e abrindo uma nova perspectiva em termos de monitoração, diagnóstico e controle ativo de vibrações em máquinas rotativas.

Os resultados numérico e experimental mostraram-se coerentes com o caráter girante da força de excitação, sendo esta uma forma bastante válida para se fazer identificação modal experimental de sistemas rotativos, por possibilitar a excitação, sem contato, do sistema durante a rotação e permitir a excitação de modos diretos e retrógrados do mesmo.

A não-linearidade existente no modelo matemático completo será objeto de investigação mais detalhada, no sentido de se obter uma resposta mais precisa a essa perturbação.

## 7. AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Pesquisa em Energia Elétrica - CEPTEL/ELETROBRÁS, pelo apoio técnico e de oficinas na construção do excitador eletromagnético, e ao CNPq pela bolsa concedida ao primeiro e segundo autores.

## 8. REFERÊNCIAS

- Bessa, M. F., 1997, “Cálculo de Forças em Mancais Magnéticos através do Mapeamento de Campo por Elementos Finitos”, Tese M.Sc., Depto. Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, BRASIL
- Ewins, D. J., 1984, “Modal Testing: Theory and Practice”, John Wiley&Sons, UK
- Joh, T. D. and Lee, C. W., 1993, “Excitation Methods and Modal Parameter Identification in Complex Modal Testing of Rotating Machinery”, Journal of Analytical and experimental Analysis, V. 8, No. 3, pp.179-203
- Lalanne, M. and Ferraris, 1998, “Rotordynamics Prediction in Engineering”, John Wiley&Sons, 2<sup>nd</sup> Edition, London, UK
- Meirovitch, L., 1967, “Analytical Methods in Vibrations”, Collier-Macmillan Limited, London, UK
- Mendes, S. R. A., 1999, “Projeto e Implementação de um Mancais Magnético Axial”, Projeto de fim de curso, Depto. Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, BRASIL
- Murta, M. S., 2000, “Projeto, Construção e Avaliação Dinâmica de um Rotor Vertical Suportado em Mancais Hidrodinâmicos”, Tese de M.Sc., Depto. de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, BRASIL
- Rocha, R. O., 1992, “Modelagem e simulação Computacional em Dinâmica de Rotores via Método de Elementos Finitos”, Tese de M.Sc., Depto. de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, BRASIL
- Santisteban Larrea, J. A., 1999, “Estudo da Influência da Carga Torsional sobre o Posicionamento Radial de um Motor-Mancais”, Tese D.Sc, Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, BRASIL
- Weber, H. I., 1987, “Dinâmica de Rotação: Conceitos Básicos, Fenômenos e Prioridades atuais de Pesquisa”, Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM87, Florianópolis, BRASIL, pp. 27-31

## ELECTROMAGNETIC EXCITER DESIGNED FOR ROTOR MODAL ANALYSIS

**Márcio Feres Bessa** - [bess@uninet.com.br](mailto:bess@uninet.com.br)

Federal University of Rio de Janeiro – PEM/COPPE/UFRJ

**Moysés Zindeluk** - [moyses@serv.com.ufrj.br](mailto:moyses@serv.com.ufrj.br)

Federal University of Rio de Janeiro – PEM/COPPE/UFRJ

**Renato de Oliveira Rocha** - [renato@cepel.br](mailto:renato@cepel.br)

ACME – Electric Energy Research Center – CEPPEL/ELETROBRÁS

**José Andrés Santisteban Larrea** – [jasl@mec.uff.br](mailto:jasl@mec.uff.br)

Fluminense Federal University – PGMEC/UFF

***Abstract:** The experimental modal identification of a shaft-disc-bearings rotating system, aims the identification of modal parameters for different rotation speeds, where one of the greatest challenges is the model excitation through its entire orbital path. Using the magnetic bearings technology, the design of an electromagnetic exciter is described, aiming to be in a vertical rotating machine prototype. An asynchronous rotating driving force is generated, which enables more detailed experimental studies of the dynamical behavior of such a system. The analytical model and the first results on the effects of the rotary force are shown.*

***Keywords:** Rotating Machineries, Electromagnetic Exciter, Rotating Force*