

SISTEMAS DE CONTROLE PARA MANCAIS MAGNÉTICOS ATIVOS

Alves, J. S.

Betti, F.

Pierri, P. S.

Porsch, M. C.

CTMSP - Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 - CEP 05598-000 - São Paulo - SP - Brasil

Resumo: O presente trabalho visa dar uma visão geral das etapas de projeto de sistemas controlados ativamente através de mancais magnéticos. Os principais dispositivos eletro-mecânicos usados, tais como sensores, atuadores, amplificadores de potência e hardware de controle serão apresentados. Ênfase especial será dada às diferentes técnicas de projeto e implementação de controles. Aplicações de mancais magnéticos para rotores de alta rotação desenvolvidas no CTMSP ilustrarão alguns métodos de modelagem, simulação e ensaios. Finalmente, algumas possibilidades especiais de melhoria de desempenho exclusivas de sistemas que utilizam este tipo de mancal, tais como: auto-monitoração (manutenção preditiva inerente), auto-balanceamento, redução ativa de vibração/ruído, otimização do consumo, entre outras, serão discutidas.
Palavras chave: Mancais Magnéticos, Controle, Dinâmica de Rotores.

Abstract: The present paper scopes on general concepts involving the design steps of actively controlled systems using magnetic bearings. The basic electromechanical devices, like sensors, actuators, power amplifiers and control hardware are shown. Some design/implementation techniques used in the controllers are highlighted. Finally, special performance enhancement possibilities only available for such kind of bearings, like self-diagnose (inherent predictive maintenance), self-balancing, active noise/vibration reduction, consumption optimization and others are briefly discussed.

Key words: Magnetic Bearings, Control, Rotordynamics.

1. INTRODUÇÃO

Mancais magnéticos apresentam diversas características interessantes e vantajosas em relação a mancais convencionais, tais como operação sem contato, eliminando desgaste mecânico e sistemas de lubrificação, menor consumo de energia, controle ativo de vibração, facilidade de manutenção e de auto-diagnóstico.

2. CONFIGURAÇÃO GERAL

O sistema básico de um rotor com mancal magnético ativo [1], esquematizado na figura 1, é composto por:

- conjunto de bobinas responsáveis pela atuação radial sobre o rotor (estator radial);
- conjunto de sensores de posição radial do rotor;
- superfície do rotor para atuação radial (material laminado);
- conjunto de bobinas responsáveis pela atuação axial sobre o rotor (estator axial);
- sensor de posição axial do rotor;
- disco de material ferromagnético para atuação axial;
- mancais de esbarro
- motor;

Dado que o mancal magnético é intrinsecamente instável, é necessário uma malha de controle para se

obter um comportamento estável, conforme a figura 2.

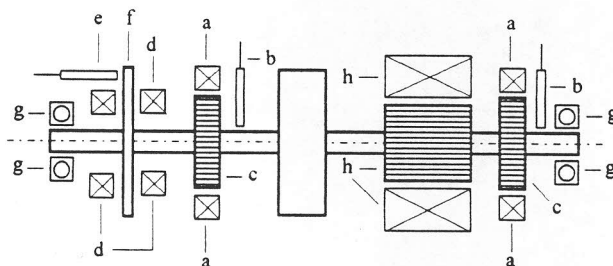


Fig. 1 - Configuração usual de um rotor com mancais magnéticos

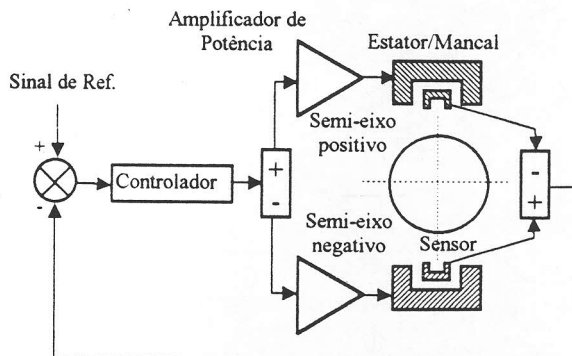


Fig. 2 - Diagrama esquemático de um mancal magnético ativo

Devido ao caráter puramente atrativo das forças magnéticas, surge a necessidade da utilização de

dois semi-eixos diametralmente opostos de atuação (fig.2), tanto nos eixos radiais quanto no eixo axial.

3. SENSORES

Os sensores usados na determinação da posição do rotor são principalmente de 2 tipos:

- Indutivos: compõem-se de uma ponte de indutâncias, excitada por uma frequência da ordem de dezenas de KHz, cuja saída é função da relutância variável com o entreferro (gap). Demodulação síncrona pode ser usada para preservar a informação do sentido do deslocamento. São adequados ao uso nos eixos radiais, pois funcionam bem sobre materiais laminados, são razoavelmente lineares e, graças à configuração em ponte, a sua saída é o próprio erro de descentragem. A sensibilidade típica sobre lâminas de FeSi é de cerca de 8 V/mm, é linear dentro de ± 0.5 mm e responde em frequência de DC a 1 KHz.

- Indutivo por correntes parasitas (eddy current): excitado por frequências consideravelmente maiores (da ordem de MHz), atua sobre superfícies condutoras homogêneas. Emprega um circuito ressonante cujo fator de mérito varia com o gap e usa detetor de envoltória como método de demodulação. Tem como vantagens sobre o sensor indutivo: poder atuar sobre materiais maciços, ser linear em uma faixa mais ampla (2 mm típico) para uma sensibilidade de 8 V/mm, mesmo quando não em ponte e respondendo em frequência de DC a 10 KHz. Entretanto, é mais susceptível a imperfeições mecânicas e eletromagnéticas da superfície de leitura.

4. ATUADORES

Consistem, em cada eixo, de um par de bobinas excitadas em contrafase, possibilitando a aplicação de força em ambos os sentidos. O circuito magnético é fechado através do material ferromagnético do rotor, que pode ser tanto laminado (radiais) quanto maciço (caso axial). Tal circuito é dimensionado levando em conta a capacidade de carga necessária, limitações dimensionais, térmicas e de saturação magnética. No caso de sensores colocados próximos aos atuadores, procura-se evitar concatenação de fluxos dispersos e eventualmente utilizam-se blindagens eletrostáticas.

Devido à sua complexidade, o projeto magnético é auxiliado por programas de elementos finitos especializados. Posteriormente, os mancais são ensaiados em bancadas [2].

A força aplicada ao rotor por uma bobina pode ser expressa de forma simplificada pela seguinte equação:

$$f(i, x) = -k \left(\frac{i}{x} \right)^2 \quad (1)$$

onde: f : é a força gerada pelo mancal;
 k : Constante de força;
 i : corrente que passa pela bobina;
 x : distancia entre estator e superfície de atuação.

5. AMPLIFICADORES DE POTÊNCIA

Recebem o sinal de saída dos controladores, convertendo-o em um sinal proporcional de corrente que é enviado à bobina do atuador. Podem ser do tipo linear baseado em transistores bipolares, de baixa eficiência e de concepção simples ou chaveados, baseados em MOSFET's de potência, de concepção mais complexa e alta eficiência, porém geradores em potencial de ruído elétrico.

Apesar da maior complexidade dos amplificadores chaveados, atualmente podem ser considerados como padrão quando se fala de atuadores para sistemas de mancais magnéticos, devido à alta eficiência e dimensões compactas.

6. CONTROLE

6.1. PROJETO

Um controle de malha fechada para o sistema rotor/mancais é essencial para operação estável. A figura 3 mostra o diagrama de blocos básico de um eixo. O emprego de controladores SISO para cada eixo tem levado a bons resultados, no que pese haver acoplamentos entre eixos (efeito giroscópico, por exemplo).

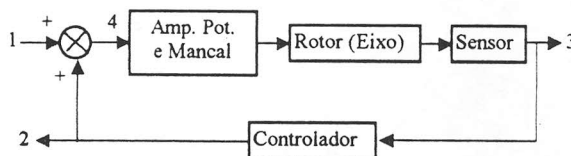


Fig. 3 - Diagrama de blocos da malha fechada (1 eixo)

Um sistema deste tipo pode ser representado pelo seguinte sistema de equações de segunda ordem:

$$M\ddot{y} + D\dot{y} + Ky = f \quad (2)$$

onde: **M**: matriz de massa e inércias;
D: matriz de amortecimento interno e efeito giroscópico;
K: matriz de rigidez interna;
 y : vetor de variáveis de posição;
 f : vetor de força externas (mancal magnético e perturbações);

As matrizes **M**, **D** e **K** são obtidas através da modelagem mecânica do rotor. São usados dois métodos: um analítico, que representa o rotor como

corpos rígidos unidos por elementos de rigidez e amortecimento (Sistema Multi-corpos) sobre os quais aplicam-se as equações de Newton-Euler (ou Lagrange) e deduzem-se as equações de movimento. Um outro método presta-se a rotores que não são bem representados pelo método anterior, como por exemplo rotores flexíveis contínuos. Neste caso, faz-se uma redução modal [3, 4] para o adequado número de graus de liberdade, a partir de um modelo de muitos graus de liberdade obtido pelo processo de elementos finitos ou de uma análise modal experimental.

A equação (2) pode ser colocada na forma de variáveis de estado [5]:

$$\dot{\mathbf{x}}_m = \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m + \mathbf{B}_m \mathbf{f} \quad (3a)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_m \mathbf{x}_m \quad (3b)$$

onde $\mathbf{x}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \dot{\mathbf{y}} \end{bmatrix}$ é o vetor de estado mecânico,

$$\mathbf{A}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C}_m = [\mathbf{I} \quad \mathbf{0}];$$

matriz do sistema mecânico e matriz de saída e,

$$\mathbf{B}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix}; \text{ matriz de entrada de força.}$$

Convém notar que o modelo utiliza os mesmos deslocamentos \mathbf{y} como saída, como pode ser visto em (3b). O modelo pode ter mais graus de liberdade que o número de sensores, desde que cada um deles corresponda a um dos componentes de \mathbf{y} .

Cada controlador, correspondente a um eixo, pode também ser descrito na forma de estado:

$$\dot{\mathbf{x}}_{c,i} = \mathbf{A}_{c,i} \mathbf{x}_{c,i} + \mathbf{B}_{c,i} u_i \quad \text{e} \quad v_i = \mathbf{C}_{c,i} \mathbf{x}_{c,i} \quad (4a \text{ e } 4b)$$

onde $\mathbf{x}_{c,i}$ é o vetor de estado do controlador, para o i -ésimo eixo,

$$\mathbf{A}_{c,i} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-2} & -a_{n-1} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_{c,i} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(n-1) \times 1} \\ 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C}_{c,i} = [c_0 \quad \dots \quad c_w \quad \mathbf{0}_{1 \times (n-w)}];$$

Os coeficientes a_i e c_i vêm da função de transferência do controlador dada por:

$$G(s) = \frac{c_w s^w + c_{w-1} s^{w-1} + \dots + c_1 s + c_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}; \quad (w < n)$$

A excitação u_i para este sistema é a leitura dos sensores de deslocamento para o respectivo eixo, sendo v_i a tensão entregue aos estágios de potência do mesmo.

Por outro lado, a lei de força para um semi-eixo dada por (1) pode ser linearizada para pequenas perturbações em torno do ponto de operação (x_0, i_0) [6], ou seja:

$$f(i, x) = f(i_0, x_0) + \left. \frac{\partial f(i, x)}{\partial x} \right|_{x=x_0} x + \left. \frac{\partial f(i, x)}{\partial i} \right|_{i=i_0} i$$

$$f(i, x) = k \frac{i_0^2}{x_0^2} - 2k \frac{i_0^2}{x_0^3} x + 2k \frac{i_0}{x_0^2} i = f_0 - k_x x + k_c i$$

Assim, em um eixo tem-se conforme a figura 4:

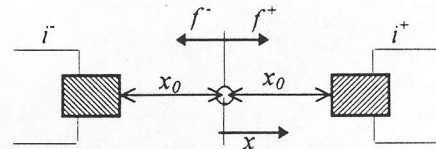


Fig. 4 - Definição de forças e deslocamentos para um eixo

i^+ é a corrente do semi-ciclo positivo do estágio de potência (deslocamento negativo, força positiva f^+) e i^- a do semi-ciclo negativo (deslocamento positivo, força negativa f^-).

A força linearizada nos mancais é:

$$f_m = f^+ + f^- = 2k_x x + k_c (i^+ - i^-)$$

$$\text{chamando } i_p = -i^+ - i^-.$$

$$f_m = 2k_x x - k_c i_p \quad (5)$$

Em todos os mancais é introduzida uma corrente DC de polarização, mesmo naqueles que não são solicitados estaticamente, para que haja uma certa rigidez em torno do ponto de equilíbrio.

Na equação (5) nota-se que o primeiro termo depende apenas do deslocamento, podendo ser introduzido convenientemente na matriz de rigidez mecânica \mathbf{K} . Já o segundo termo pode ser escrito para cada eixo, com i_p em função de v_i levando em conta que os estágios de potência podem ser modelados como simples ganhos $k_{a,i}$ (caso isto não ocorra, a sua dinâmica pode ser incorporada junto à dinâmica dos controladores). Assim:

$$f_{m,i} = -k_{c,i} k_{a,i} v_i \quad (6)$$

De forma análoga, u_i pode ser colocado em função de y_i (componente do vetor y) e da sensibilidade do sensor correspondente, $k_{s,i}$:

$$u_i = k_{s,i} y_i \quad (7)$$

Com base nisto pode-se escrever o sistema definido por (4a) e (4b) em termos de deslocamento e força:

$$\dot{x}_{c,i} = A_{c,i} x_{c,i} + \bar{B}_{c,i} y_i \quad e \quad f_i = \bar{C}_{c,i} x_{c,i} \quad (8a \text{ e } 8b)$$

$$\text{onde: } \bar{B}_{c,i} = k_{s,i} B_{c,i} \quad e \quad \bar{C}_{c,i} = -k_{c,i} k_{a,i} C_{c,i}$$

De posse das equações (3a), (3b), (8a) e (8b), pode-se contruir um sistema na forma de estados que represente o conjunto rotor, mancais e controladores em malha fechada. Tal sistema, exemplificando o caso em que o rotor é modelado com 5 graus de liberdade de translação e 5 eixos ativos, é dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{x}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & B_m C_e \\ B_e C_m & A_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ x_e \end{bmatrix} \quad (9)$$

onde:

$$x_e = [x_{c,1} \quad x_{c,2} \quad x_{c,3} \quad x_{c,4} \quad x_{c,5}]^T$$

$$A_e = \begin{bmatrix} A_{c,1} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & A_{c,2} & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & A_{c,3} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & A_{c,4} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & A_{c,5} \end{bmatrix}$$

$$B_e = \begin{bmatrix} \bar{B}_{c,1} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \bar{B}_{c,2} & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \bar{B}_{c,3} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \bar{B}_{c,4} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \bar{B}_{c,5} \end{bmatrix}$$

$$C_e = \begin{bmatrix} \bar{C}_{c,1} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \bar{C}_{c,2} & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \bar{C}_{c,3} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \bar{C}_{c,4} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \bar{C}_{c,5} \end{bmatrix}$$

As sub-matrizes nulas (0) devem ter as dimensões adequadas, em função da ordem de cada

controlador. Se o modelo possuir mais graus de liberdade do que o número de eixos ativos, as matrizes acima deverão ser montadas de forma conveniente, de modo que cada controlador receba como entrada o deslocamento do eixo correspondente e atue no mesmo eixo. O mesmo se aplica no caso de controladores MIMO, onde haverá mas matrizes A_e , B_e e C_e , elementos fora da diagonal (bloco diagonal) principal.

A montagem deste sistema é realizada através do pacote computacional ADS desenvolvido no CTMSP (inicialmente como um programa autônomo, posteriormente como um *toolbox* do MATLAB). O sistema mecânico é representado numericamente por redução modal ou analiticamente pelas matrizes da equação (2). No modelo analítico, a entrada é feita de forma simbólica, o que permite que se realize avaliação de sensibilidade à variação de parâmetros. Os controladores são representados ou por funções de transferência ou por polos e zeros, sendo também permitida variação paramétrica nos mesmos. Pode-se realizar análise de autovalores e autovetores (estabilidade), resposta em frequência e resposta ao desbalanço do sistema em malha fechada. Isto permite ao projetista realizar as principais análises pertinentes a um sistema linear, bem como realizar a síntese dos controladores por alocação de polos. Em alguns casos, quando se julgar conveniente o uso de técnicas "modernas" de controle, tais como reguladores lineares quadráticos com observadores de estado ou controladores projetados no domínio da frequência (H_∞), a junção com as funções do MATLAB torna-se particularmente adequada.

De posse destas ferramentas, deve-se buscar um controlador que atenda aos requisitos de projeto, tais como: rigidez, rejeição a perturbações, baixo consumo, baixo ruído, amortecimento de modos de flexão no caso de rotores super-críticos, obviamente garantindo a estabilidade de modos de vibrar dentro da faixa de operação e procurando não excitar modos fora dela.

Obtidos os controladores, é sempre pertinente realizar-se simulações no domínio do tempo considerando a não linearidade da lei de força (1). Para tanto, utiliza-se o programa SIMULINK, onde são realizadas simulações do transitório de levitação (resposta a degrau) e outras. O resultado destas simulações algumas vezes indica a necessidade de controladores mais robustos e/ou o emprego de circuitos (ou algoritmos) linearizadores.

6.2. IMPLEMENTAÇÃO

O controlador, em sua versão analógica, é formado por uma sequência de filtros lineares, tais como: integrador, avançadores de fase, filtros passa-baixas e filtros a variáveis de estado, para funções biquadráticas. O ganho deve ser criteriosamente

distribuído entre os estágios, para garantir um bom compromisso entre faixa dinâmica (prevenindo saturações) e relação sinal-ruído.

Dependendo dos critérios empregados, a função de transferência a ser implantada apresenta ganho elevado em "altas frequências" (ao redor de 1 KHz), com prejuízo para a relação sinal-ruído. Uma saída consiste em intercalar um filtro passa-baixas, de acordo com os requisitos de projeto citados anteriormente.

Uma técnica mais moderna consiste na implementação digital via *software*, através de um *hardware* baseado em DSP (*digital signal processor*). A função de transferência tem que ser discretizada através de transformações envolvendo transformada z . O interfaceamento com sensores e mancais é feito através de conversores A/D e D/A, com taxa de amostragem mínima de 8 vezes a frequência máxima da faixa de operação. Um bom compromisso entre velocidade, precisão numérica (resolução) e facilidade de implementação consegue-se com a utilização de filtros IIR de 2ª ordem em cascata. No âmbito do CTMSP, algumas experiências foram feitas com o processador TMS320C25, da Texas [8].

7. TESTES

Após a implementação, o sistema completo rotor/mancais é ensaiado para verificação do comportamento dinâmico real. Para isso os mancais magnéticos possuem uma característica interessante que é a de poderem ser utilizados como excitadores sem contato, durante a operação da máquina. Assim, na figura 3, injetando-se um sinal no ponto 1 e tomando-se a função de transferência entre os sinais do ponto 3 e do ponto 4 tem-se a função de transferência de malha aberta (incluindo as constantes do estágio de potência, do sensor e mancal). Com a mesma excitação, tirando-se a função de transferência entre os sinais do ponto 3 e do ponto 1 obtém-se a função de malha fechada para o mesmo eixo. Finalmente, excitando o sistema no ponto 3 e tomando-se como saída o ponto 2 obtém-se a função de transferência do controle. Este teste é feito com auxílio do analisador de sinais HP3563A utilizando-se como sinal de excitação uma varredura senoidal ou ruído pseudo-aleatório. É interessante notar que tanto a função de transferência da planta quanto a da malha fechada podem ser levantadas durante a operação, em diversas rotações. Através de um *curve fitting* dessas funções, o modelo teórico pode ser aprimorado e conseqüentemente o controle refinado. Este procedimento deve ser usado com reservas em sistemas com forte acoplamento entre eixos. Abaixo tem-se o resultado deste ensaio para um eixo de uma bancada de teste.

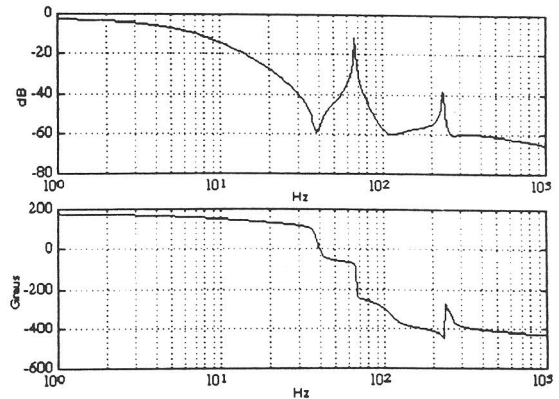


Fig. 5 - Malha aberta (1 eixo)

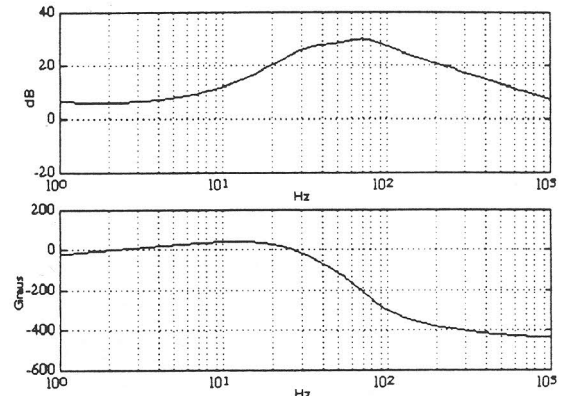


Fig. 6 - Controlador

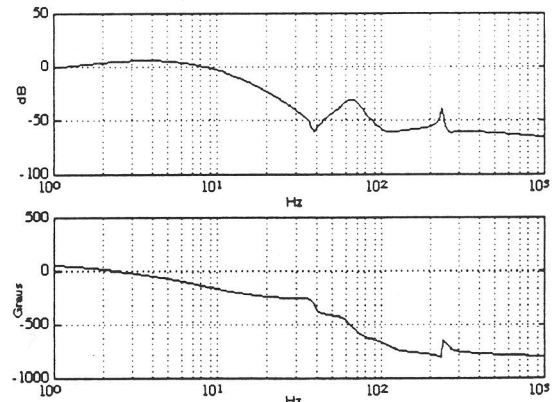


Fig. 7 - Malha fechada (1 eixo)

8. APLICAÇÕES

Mancais magnéticos têm sido utilizados em equipamentos onde a eliminação das superfícies de contato permitem um baixíssimo desgaste mecânico, diminuição de consumo de motor, e eliminação de lubrificantes [7]. Esta última característica ocasiona a não contaminação por óleo de eventuais fluidos de processo, além de eliminar custos de fabricação e manutenção de sistemas auxiliares, como bombas, tanques e válvulas. Uma característica importante é que um rotor com o *layout* da figura 1 (com mancais e motor integrados) é extremamente adequado à construção de equipamentos selados, evitando assim possíveis caminhos de vazamento de algum fluido perigoso

ou caro. Assim, dentre os equipamentos industriais que utilizam esta tecnologia, pode-se citar:

- bombas de vácuo e bombas seladas (*canned pump*) para produtos químicos perigosos
- centrífugas de alta rotação;
- máquinas de usinagem de alta rotação
- Compressores criogênicos para hélio, hidrogênio, oxigênio líquido;
- Turbinas para geração de energia elétrica
- Compressores e turbinas em instalações petroquímicas, utilizando selos secos.

No CTMSP, mancais magnéticos têm sido utilizados com sucesso desde o início dos anos 80 em ultracentrífugas para enriquecimento isotópico de urânio, inicialmente em rotores sub-críticos e mais recentemente em rotores super-críticos. Justifica-se a utilização de tais mancais devido a alta rotação (acima de 1 kHz) e pelas ótimas qualidades de amortecedor ativo para passagem pelas velocidades críticas. Também foi construído uma bomba d'água com um rotor de aproximadamente 50 kg para utilização em um túnel de cavitação para ensaios hidrodinâmicos. O baixo ruído gerado justifica a utilização de sistema ativo com mancais magnéticos.

9. POSSIBILIDADES ESPECIAIS DE MELHORIA DE DESEMPENHO

- Manutenção preditiva inerente: A presença de sinais de deslocamento e de corrente nos mancais possibilita a qualquer momento o levantamento da posição, excentricidade, vibração e carga do rotor. Sendo assim, sistemas de manutenção preditiva são facilmente acopláveis a rotores que utilizam mancais magnéticos, com todas as ferramentas de análise que lhe são peculiares, e com um custo reduzido.
- Otimização de consumo: O consumo de energia dos mancais pode ser reduzido com a utilização de ímãs permanentes para suportar a carga estática, ficando para o mancal ativo apenas as cargas dinâmicas e a garantia da estabilidade. Além disso, para rotores de alta rotação é possível a adoção de *notch filters* sintonizados na rotação nominal de modo que o controlador não tente responder ao desbalanceo, reduzindo o consumo sem comprometer a estabilidade em modos de baixas frequências.
- Balanceamento eletrônico/redução ativa de vibração e ruído: A utilização de controladores digitais permite que seja injetado um sinal senoidal, síncrono com a rotação e com fases convenientes, em dois eixos ortogonais de um mancal radial, diretamente no estágio de potência dos mesmos. Este sinal deve ter a amplitude e a fase calculada de modo que seja criado um fasor (força rotativa) contrária à força de desbalanceo

que o próprio controlador estimou. Além dos sensores dos mancais, é necessário um sensor de rotação e fase (*key phasor*). O mesmo princípio pode ser estendido a outras frequências em que haja ruído.

10. CONCLUSÃO

O presente trabalho mostrou em formas gerais alguns aspectos da modelagem, projeto e aplicação de rotores com mancais magnéticos bem como suas principais características. Tendo em vista a abrangência do assunto, não buscou-se o aprofundamento em nenhum tópico específico. Espera-se que esta abordagem tenha sido ilustrativa quanto as possibilidades desta tecnologia, sobretudo para os que não a conhecem, considerando sua pouca utilização no país. Futuros trabalhos poderão detalhar os tópicos aqui introduzidos.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MASLEN, E.H., ALLAIRE, P. E., SCOTT, M. A., HERMANN, P., "Magnetic Bearing Design for a High Speed Rotor", Proceedings of the Third International Symposium on Magnetic Bearings, Alexandria, VA, USA, 1992.
- [2] TRAXLER, A., SCHWEITZER, G. "Measurement of The Force Characteristic Contactless Elettromagnetic Rotor Bearing", IMEKO Intern. Measur. Conf., Symposium on Measurement and Estimation, Italy, 1984.
- [3] LALANNE, M., BERTHIER, P., DER HAGOPIAN, J. "Mechanical Vibrations for Engineers", John Wiley & Sons, 1984.
- [4] NATKE, H. G. "Identification of Vibrating Structures", Springer Verlag, 1982.
- [5] SCHULTZ, D.G., MESLA, J. L., "State Functions and Linear Control Systems", McGraw-Hill Book Co., 1967.
- [6] PIERRI, P. S., PEREIRA DA SILVA, P. S., BETTI, F., "Design of Controller for Magnetic Levitation", Proceedings of the First International Symposium on Magnetic Bearings, Zurich, Swiss, 1988.
- [7] BRUNET, M., "Practical Applications of the Active Magnetic Bearings to Industrial World", Proceedings of the First International Symposium on Magnetic Bearings, Zurich, Swiss, 1988.
- [8] TMS320C2X User's Guide, Texas Instr. Inc.