

MANCAL MAGNÉTICO DO TIPO ATRAÇÃO COM CONTROLE UNIAXIAL

Oswaldo Horikawa

Departamento Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, São Paulo, 05508-900, SP, BRASIL

Isaias da Silva

Departamento Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, São Paulo, 05508-900, SP, BRASIL

Resumo. *Este trabalho tem por objetivo apresentar um novo tipo de mancal magnético com controle ativo somente na direção axial. Este mancal utiliza dois pares de ímãs permanentes atuando por atração para restringir os movimentos do rotor na direção radial. Já os movimentos na direção axial são restringidos por um sistema de controle composto de dois eletroímãs, um sensor indutivo e um controlador do tipo PID. São apresentados para este mancal, o princípio, o modelamento dinâmico e o sistema para o controle da posição axial do rotor. Finalmente, através de experimentos realizados em um protótipo, é mostrada a eficácia da concepção aqui apresentada.*

Palavras-chave: *Mancal magnético, Mecatrônica, Mancal controlado*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, um importante segmento da indústria, o de microeletrônica, busca por um novo elemento de máquina que assegure um posicionamento de alta precisão das máscaras contendo os padrões dos circuitos integrados e que possa operar mesmo no vácuo, ambiente no qual os circuitos integrados de última geração estão atualmente sendo produzidos. Para este propósito, os mancais magnéticos representam uma solução promissora. Muitos trabalhos já trataram de mancais magnéticos, mas a maioria deles visaram aplicações como bombas de vácuo e por outro lado, se referiram a mancais com controle ativo em pelo menos cinco graus de liberdade – g.d.l. (por exemplo, Schweitzer, 1991). Uma vez que o controle de g.d.l., requer um sensor, um atuador e um controlador, o projeto das partes mecânicas, elétricas e do sistema de controle torna-se extremamente complexo. Considerando isto, este artigo apresenta um nova concepção de mancal magnético, na qual somente 1 g.d.l. de um rotor (posição axial) é controlado de forma ativa. Os demais movimentos do rotor são restringidos somente pela ação dos ímãs permanentes. Diferente dos mancais magnéticos propostos por outros autores (por exemplo Ohji *et al.* 1996), aqui os ímãs permanentes trabalharão no modo de atração, de maneira a evitar o problema da desmagnetização (Campbell, 1994). Esta configuração, com o controle ativo em 1 g.d.l. é a configuração mais simples possível pois de acordo com o princípio de Earnshaw (Earnshaw, 1939), é impossível se ter uma sustentação magnética sem

controle ativo. Existem estudos mostrando a possibilidade de obtenção de mancais magnéticos sem nenhum controle ativo através da utilização de materiais supercondutores (por exemplo, Marion-Péra et al 1994) mas até o presente momento, os materiais conhecidos desenvolvem a supercondutividade somente a uma temperatura inferior a 77K, e ainda são remotas as possibilidades para uma aplicação prática.

2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO NOVO MANCAL

A Fig. 1 mostra o esquema do mancal proposto. Um ímã permanente é fixado em cada extremidade de um eixo rotativo que passa através de dois atuadores estacionários. Cada atuador é uma combinação de um eletroímã e de um ímã permanente. A polaridade de cada ímã é ajustada conforme indicado na Fig.1, de modo que haja uma força de atração em cada par de ímãs. Como será apresentado na próxima seção, garantindo um comprimento mínimo do rotor, os dois pares de ímãs permanentes garantem a estabilidade radial e angular do eixo.

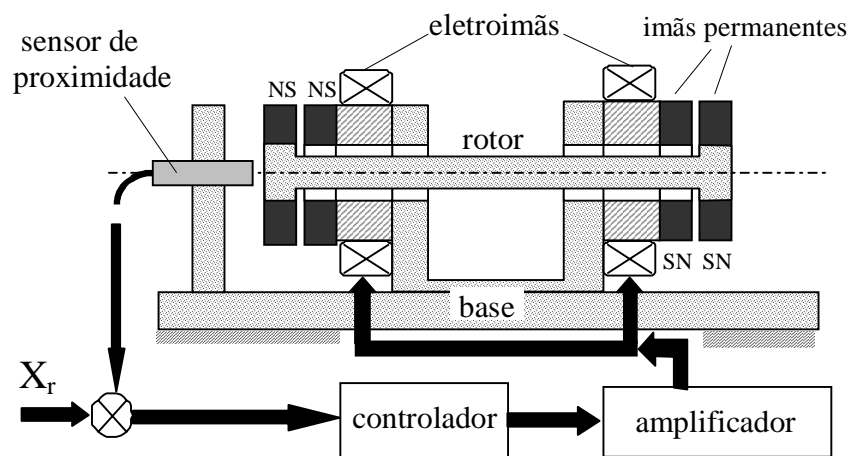


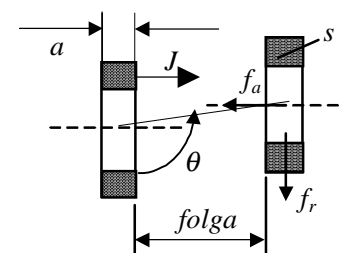
Figura1 – Configuração do mancal magnético proposto

A estabilidade na direção axial é obtida através de uma malha de controle composta por um sensor de proximidade não contactante (sensor indutivo), um controlador e um atuador eletromagnético.

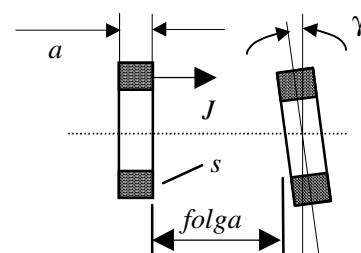
3. FORÇAS MAGNÉTICAS E RIGIDEZ NAS DIVERSAS DIREÇÕES

A Fig.2 ilustra um par de ímãs na extremidade do eixo. A Fig.2(a) mostra o caso em que um dos ímãs é deslocado radialmente. Nesta situação, a força axial f_a , força radial f_r , rigidez axial k_a e rigidez radial k_r são dadas respectivamente pelas Eqs.(1) ~ (4) (Yonnet, 1981). Por outro lado, se um dos ímãs é inclinado em relação ao outro (Fig.2(b)), observa-se uma rigidez k_γ , que pode ser representada pela Eq.(5) (Delamare, 1994).

$$f_a = 2B \sin(3\theta) / \sigma^3 \quad (1)$$



(a) Deslocamento radial



(b) Inclinação relativa

Figura 2 – Dois ímãs permanentes

$$f_r = -2B \cos(3\theta) / \sigma^3 \quad (2)$$

$$k_r = 6B \cos(4\theta) / \sigma^4 \quad (3)$$

$$k_a = -2k_r \quad (4)$$

$$k_\gamma = k_a R^2 / 2 \quad (5)$$

Nas Eqs.(1) ~ (4):

$$B = J^2 S^2 p / 2\pi\mu_0 \quad (6)$$

$$\sigma = \text{folga} + a \quad (7)$$

Sendo, J , S , p , e a , respectivamente a magnetização, a área da seção transversal, o perímetro do ímã e a sua espessura.

Como regra geral, as Eqs.(1) ~ (4) mostram que elevada rigidez axial e radial serão obtidas na parte passiva deste mancal, utilizando ímãs permanentes com: pequena espessura, grande seção transversal, elevada magnetização e grande perímetro.

4. COMPRIMENTO MÍNIMO DO EIXO

Conforme indicado pela Eq.(3), a rigidez na direção radial é positiva e portanto o rotor será estável em termos de deslocamentos radiais. Já na direção axial, embora a correspondente rigidez seja negativa (Eq.(4)), a estabilidade é garantida pela malha de controle. Contudo, a estabilidade em termos de movimentos de inclinação do rotor em torno de um eixo perpendicular ao de rotação deve ser analisada do seguinte modo.

Considere a configuração da Fig.3. A distância entre os ímãs permanentes é l . Em frente de cada ímã há outro trabalhando por atração, mantendo-se uma folga d (a disposição dos ímãs fixos à base difere da apresentada na Fig.1 mas isto é feito somente para simplificar a figura). Considerando o par de ímãs do lado esquerdo da Fig.3, quando o rotor é inclinado conforme indicado na figura, a folga entre ímãs aumenta na parte superior e diminui na inferior. Deste modo, a força de atração na parte superior torna-se menor do que a força na parte inferior. O fenômeno oposto ocorre com o par de ímãs do lado direito do rotor. Estas forças, produzirão um momento (ΣM_t) que tenderá a aumentar a inclinação do rotor. Contudo, a inclinação do rotor também causa um deslocamento radial dos ímãs do rotor, em relação aos ímãs fixados contra a base. Este deslocamento produzirá uma força radial, com sentido oposto a este deslocamento, resultando em um momento (ΣM_r) que levará o rotor de volta à sua posição original. Assim, a estabilidade do rotor será garantida se a seguinte relação for satisfeita.

$$\Sigma M_r > \Sigma M_t \quad (8)$$

Na Fig.3, foi indicada uma inclinação do rotor ao redor de um ponto P genérico. Contudo, já foi visto acima que o rotor é estável em termos de

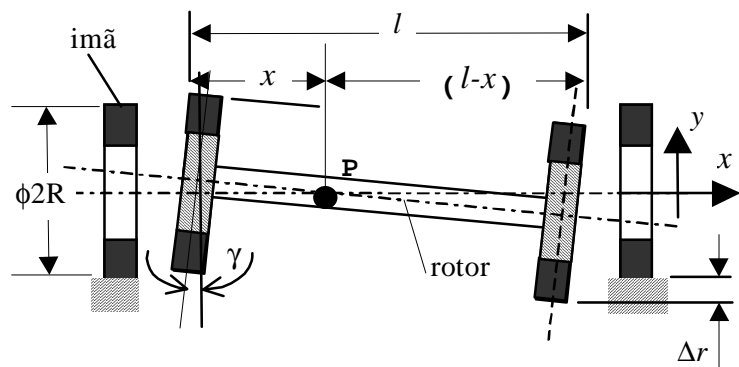


Figura 3 - Rotor inclinado

translações na direção radial e portanto, a análise da Eq.(8) exige somente o estudo do caso em que P está no centro do rotor ($x=l/2$). Em tal situação e considerando somente pequenas inclinações do rotor ($\gamma \cong 2\Delta_r/l$), são obtidas as seguintes relações.

$$\Sigma M_r = k_r \Delta_r \frac{l}{2} + k_r \Delta_r \frac{l}{2} = k_r \Delta_r l \quad (9)$$

$$\Sigma M_t = 2k_\gamma \frac{\Delta_r}{1/2} \quad (10)$$

Por outro lado, as Eqs.(4) e (5) resultam em:

$$k_\gamma = -k_r R^2 \quad (11)$$

Substituindo as Eqs.(9), (10) e (11) na Eq.(8), obtemos a seguinte relação que assegura a estabilidade angular do mancal.

$$\frac{l}{2R} > 1 \quad (12)$$

Quanto maior a distancia entre os pares de imãs, maior será o momento ΣM_r e como consequência, maior será a rigidez contra a inclinação do rotor.

5. MODELAGEM E CONTROLE DO SISTEMA

Para a modelagem do sistema de controle da posição axial do mancal, algumas simplificações são assumidas: (a) o rotor mantém simetria em torno do eixo de rotação, (b) os deslocamentos são pequenos e ocorrem em torno da posição de equilíbrio e (c) a força de atração magnética axial e a força eletromagnética podem ser linearizadas em torno de um ponto de operação. O modelo dinâmico do mancal proposto é apresentado na Fig.4. A força magnética nos imãs permanentes, $f_m(t)$ e a força eletromagnética nos eletroímãs, $f_{em}(t)$ foram linearizadas respectivamente com relação ao deslocamento $x(t)$ (posição axial do rotor em relação a um ponto arbitrário), e à corrente $i(t)$, da seguinte forma.

$$f_m(t) = k_h x(t) \quad (13)$$

$$f_{em}(t) = k_a k_t i(t) \quad (14)$$

Onde, k_h e k_t são as constantes magnética e eletromagnética e k_a é o ganho de um amplificador a ser utilizado no acionamento dos eletroímãs. Por outro lado, assumindo o uso de eletroímãs com indutância L e resistência R , a relação entre a tensão $v(t)$ que é aplicada nas bobinas e a corrente $i(t)$, que nelas circula assume a seguinte forma.

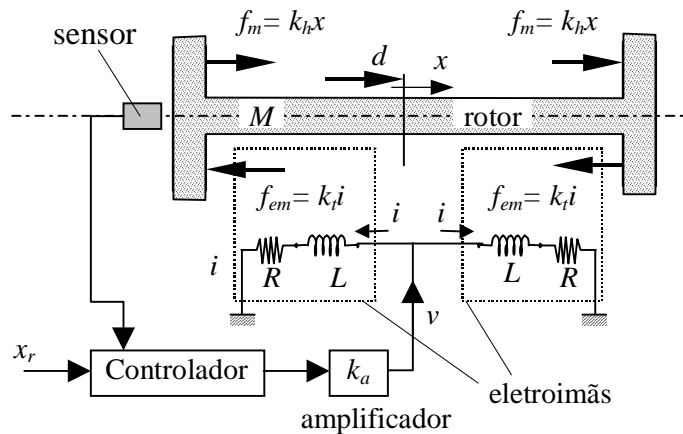


Figura 4 – Modelo dinâmico do rotor

$$L \frac{di}{dt} + Ri(t) = v(t) \quad (15)$$

Utilizando as Eqs(13) ~ (15), e sendo M a massa do rotor incluindo os imãs, obtemos a função de transferencia $G(s)$ em malha aberta do sistema Eq.(16).

$$G(s) = \frac{X(s)}{V(s)} = \frac{2k_a k_t}{LM} \cdot \frac{1}{s^3 + \frac{R}{L}s^2 + \frac{2k_h}{M}s + \frac{Rk_h}{LM}} \quad (16)$$

Neste sistema, somente um sensor indutivo de proximidade é utilizado. E a variável medida é a posição axial x do rotor relativa ao ponto de operação.

O sistema descrito pela Eq.(16) é estabilizado por um controlador do tipo PID dado pela Eq.(17).

$$G_c(s) = \left(k_p + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\tau s + 1} \right) \quad (17)$$

Sendo, k , T_i , T_d e τ respectivamente o ganho do controlador, a constante de tempo do integrador, o ganho derivador e a constante de tempo do filtro de primeira ordem atrelado ao derivador. O diagrama de blocos do sistema de controle é apresentado na Fig.5.

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Como primeira etapa do desenvolvimento do mancal, um imã permanente em forma de coroa circular, de FeBa ($J = 0.25T$, magnetização axial, $S = 63\text{mm}^2$, $p = 84.8\text{mm}$ e $a = 7\text{mm}$) foi selecionado por conveniência na construção. Utilizando estes imãs, as forças axial e radial foram determinadas experimentalmente e simuladas utilizando as Eqs.(1)~(6) e também pelo método dos elementos finitos. Os resultados são apresentados nas Figs.6(a) e 6(b).

Utilizando o controlador PID citado anteriormente, vários experimentos foram efetuados em um protótipo apresentado na Fig.7. Parâmetros do mancal foram medidos experimentalmente e parâmetros do controlador definidos através de simulações baseadas nas Eqs.(16) e (17). Todos os parâmetros e os respectivos valores estão apresentados na Tab.1.

A Figura 8 mostra a posição axial x do rotor sem rotação e sem nenhum distúrbio sendo aplicado neste. Observa-se uma vibração contínua com amplitude de aproximadamente

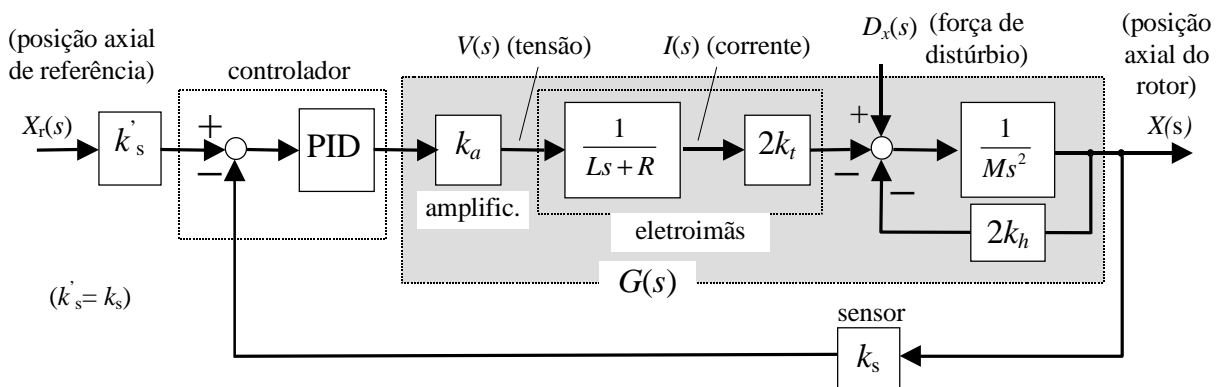


Figura 5 – Diagrama de blocos do sistema de controle do mancal magnético

2 μ m. Esta vibração foi causada principalmente por ruídos elétricos gerados pelo sensor e circuitos elétricos do controlador. Já a Fig.9 mostra a resposta à forças impulsivas aplicadas axialmente no rotor. Em função da força, o rotor se desloca momentaneamente da sua posição nominal de operação mas a posição original é restaurada rapidamente.

O controlador foi também equipado com uma entrada para sinal de referência (posição de referência x_r). A Fig.10 mostra a resposta à uma entrada de um sinal de referência na forma de degrau de 0.08mm de altura. Em menos de 0.2 segundos, o rotor alcança a posição comandada e mantém a nova posição com uma precisão de 2 μ m.

Este resultado mostra a capacidade deste mancal em realizar o posicionamento do eixo de forma rápida e precisa. Tal

Tabela 1. Parâmetros

Sistema	Símbolo	Valor	Unid
Constante magnética	k_h	6.5×10^3	N/m
Constante eletromagnética	k_t	1.2	N/A
Massa do rotor	M	0.2	kg
Ganho do sensor	$k_s = k_s'$	5×10^3	V/m
Ganho do amplificador	k_a	10	---
Folga nominal	x_0	5×10^{-4}	m
Indutância	L	0.01	H
Resistência	R	13	Ω

Controlador	Valor	Unid
k_p	7.93	---
T_i	2.27×10^{-3}	seg
T_d	5.17×10^{-2}	seg
τ	2.20×10^{-4}	seg

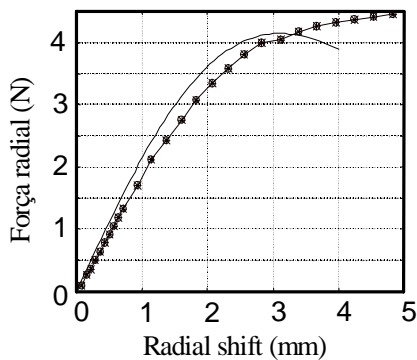


Figura 6(a) - Força radial vs deslocamento

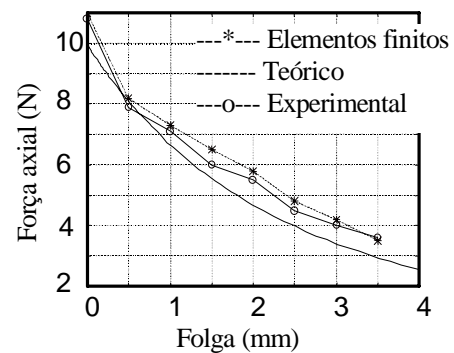


Figura 6(b) - Força axial vs folga

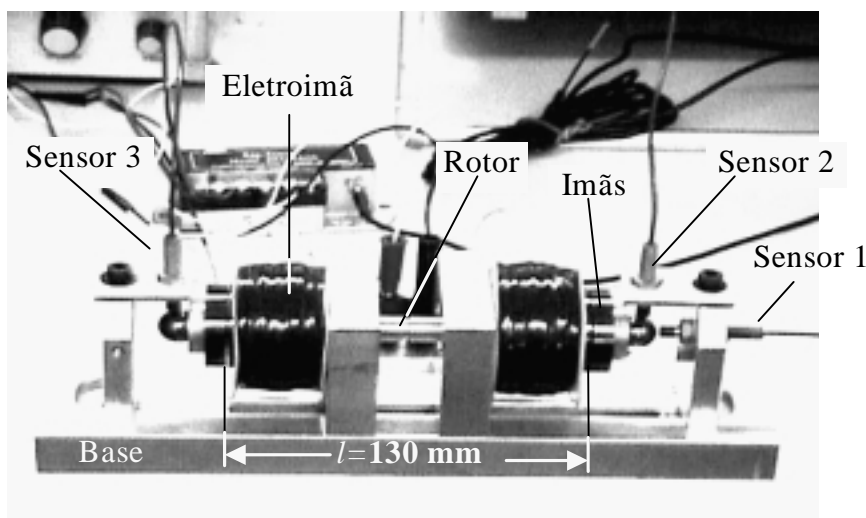


Figura.7 Protótipo do mancal magnético

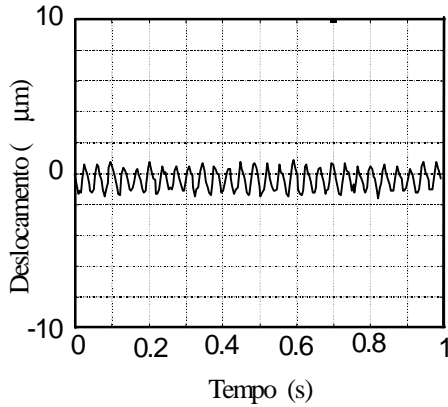


Figura 8. Vibrações do rotor na direção axial

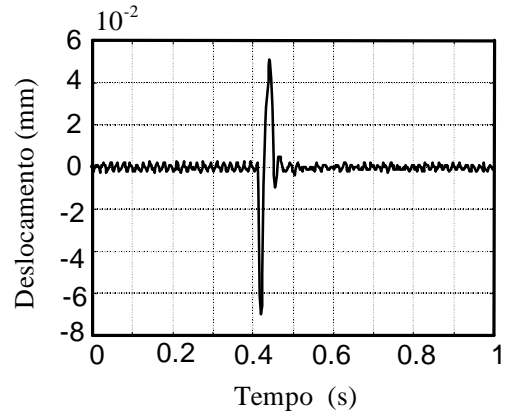


Figura 9. Resposta a força em impulso

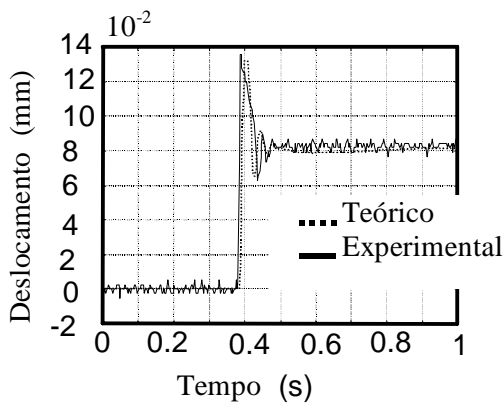


Figura 10. Resposta ao degrau

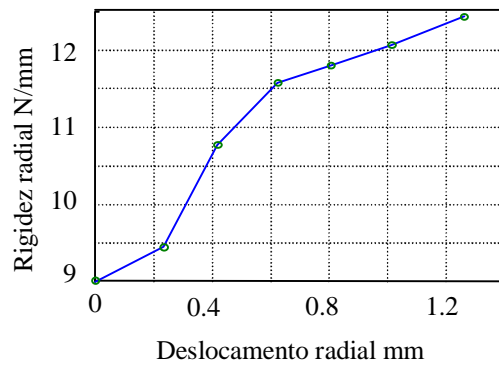


Figura 11. Rigidez radial do mancal

capacidade abre possibilidade por exemplo para compensar erros sistemáticos de movimento de rotação na direção axial.

A Fig.11 mostra o resultado da medição da rigidez na direção radial do protótipo. A curva da rigidez apresenta um destacada não linearidade e esta aumenta conforme aumenta o deslocamento radial do rotor.

Em conjunto com o sensor utilizado para medição do deslocamento axial do rotor, o protótipo também foi equipado com dois outros sensores de proximidade, sensor 2 e 3 indicados na Fig.7, para medir o deslocamento radial do rotor. A Fig.12 mostra as leituras dos sensores na direções radial e axial (sensores 1, 2 e 3), com o rotor girando a 50rpm. O rotor mantém-se em uma posição fixa com um erro menor que $2\mu\text{m}$. Em conjunto com o erro devido aos ruídos elétricos (Fig.8), observa-se um erro sincronizado com a rotação. Há duas possíveis causas para este erro. A primeira, é o erro de planicidade e de montagem do alvo que o sensor está medindo. A segunda, é a não-uniformidade da magnetização dos ímãs permanentes que produzem forças cíclicas na direção axial. Fatores similares também poderiam ter dado origem aos erros na direção radial. Observa-se que os sensores 2 e 3 mediram erros cíclicos, sincronizados com a rotação, com amplitude da ordem de 0.3mm .

Medições semelhantes foram repetidas com o rotor girando a 500rpm. A Figura 13 mostra os resultados. Na direção axial, a amplitude do erro aumentou para aproximadamente $4\mu\text{m}$ indicando que a capacidade de atenuação de vibração do sistema de controle se reduz à medida que aumenta a frequência das componentes acima citadas que deram origem à vibração. Observa-se por outro lado que na direção radial, a amplitude das vibrações se mantiveram próximas a 0.3mm apesar de um aumento de 10 vezes na velocidade rotação do rotor. Isto sugere que as oscilações que foram observadas nas leituras dos sensores 2 e 3 não

representam vibrações do eixo mas o erro de forma dos alvos contra os quais os sensores foram apontados.

7. AUMENTO NA RIGIDEZ RADIAL

Com o objetivo de aumentar a rigidez na direção radial, foram acrescentados mais dois ímãs permanentes em cada extremidade do rotor, conforme mostra a Fig.14. Neste novo arranjo, cada ímã permanente fixo ao rotor passa a ter um ímã estacionário em ambos os lados. Desta forma, para um mesmo deslocamento radial do rotor, a força de restauração dada pela Eq.(3) é simplesmente duplica e dessa forma tem-se um aumento na rigidez radial.

Mesmo nesta nova configuração, o critério para garantia da estabilidade do rotor, apresentado no item 4, se mantém o mesmo. Isto porque, se o momento que faz com que o rotor incline (ΣM_t , Eq.(9)) duplica em função dos 2 ímãs adicionais, o momento de restauração (ΣM_r , Eq.(10)) também duplica pela mesma razão. E dessa forma, chega-se à mesma conclusão dada pela Eq.(12).

Sem modificações no rotor ou nos eletroímãs, foram acrescentados mais 2 ímãs ao protótipo do mancal, conforme foi indicado na Fig.14. A rigor o sistema de controle sofre uma ligeira modificação e a constante k_h indicada no modelo dinâmico da Fig.4 e no diagrama de blocos da Fig.5, passa a ser $2k_h$. Porém as simulação do modelo dinâmico do mancal mostrou que a alteração desta constante pouco afetaria no desempenho do mancal e dessa forma optou-se por utilizar o mesmo controlador descrito na Tab.1. Nestas condições foram repetidos os

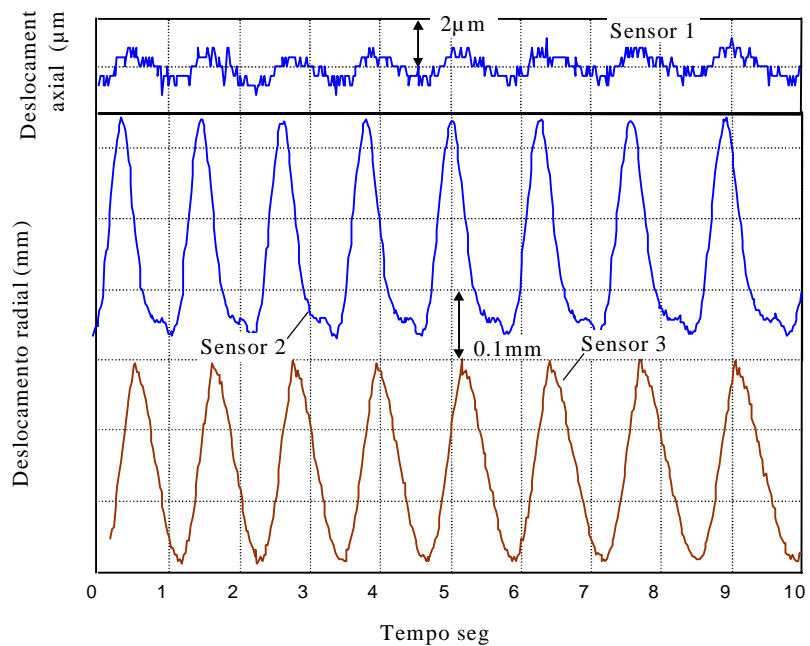


Figura 12. Vibrações do rotor à 50rpm

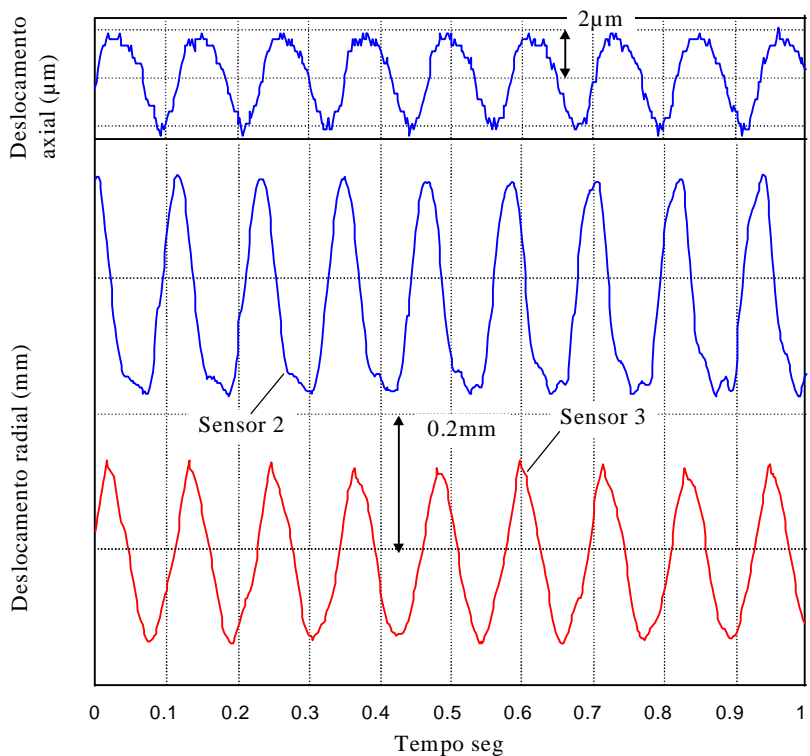


Figura 13. Vibrações do rotor à 500rpm

experimentos realizados com respeito ao modelo de 4 ímãs, e que foram apresentados anteriormente. Resultados similares foram obtidos exceto que, conforme previsto, a rigidez na direção radial foi duplicada através da colocação dos 2 ímãs adicionais, conforme pode se observar através da Fig.15.

A título de ilustração, a Fig.16 apresenta as leituras dos sensores 1, 2 e 3, com o rotor girando a 500rpm. Observa-se pelas leituras dos sensores 2 e 3 que as vibrações na direção radial foram de aproximadamente 0.3mm e portanto muito próximas às observadas na configuração com 4 ímãs (Fig.13), apesar da diferença na forma das vibrações. Uma diferença maior é observada quanto à amplitude das vibrações na direção axial, que praticamente duplicou comparado ao caso da Fig.13. Ao proceder à colocação dos ímãs adicionais, todos os sensores e seus respectivos suportes tiveram de ser removidos e montados novamente. Acredita-se que em função disso, tenham ocorrido ligeiras alterações nas porções dos alvos onde os sensores realizam as medições. Daí a diferença na forma das curvas de vibração na direção radial e na amplitude, na direção axial. Um estudo conclusivo a cerca destes problemas deverá ser objeto de um estudo futuro. Por hora, o resultado mostra que o mancal com rigidez radial aumentada através do acréscimo de ímãs, continua permitindo uma suspensão estável do rotor mesmo a uma velocidade de 500rpm.

8. CONCLUSÕES

Foi apresentada uma nova concepção de mancal magnético com controle ativo somente em um grau de

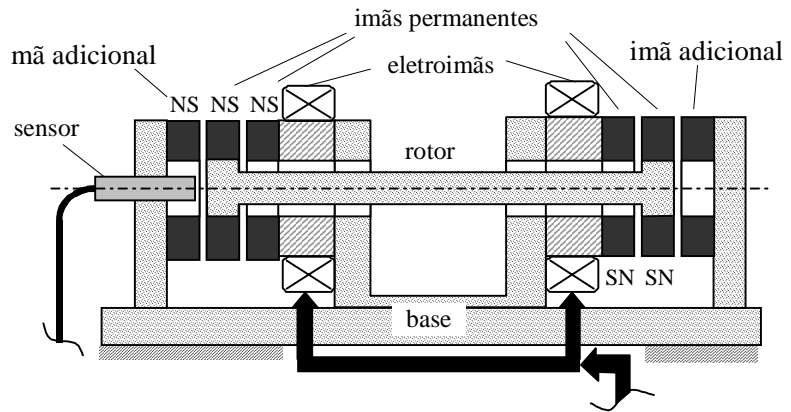


Figura 14 – Versão do mancal com 6 ímãs permanentes

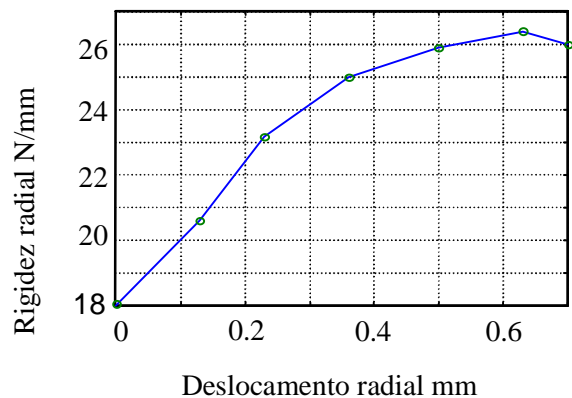


Figura 15 – Rigidez radial

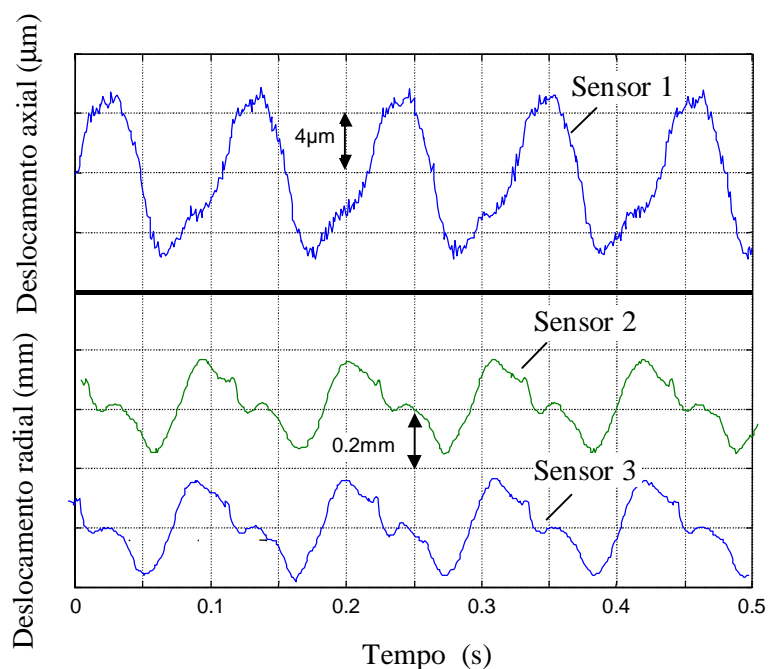


Figura 16 – Vibrações do rotor à 500rpm

liberdade. Os demais graus de liberdade são restritos pela ação dos ímãs permanentes que atuam por atração. O princípio deste mancal foi apresentado e os pontos mais relevantes a serem considerados no projeto foram descritos. Finalmente, através de experimentos, foram mostrados que o mancal é capaz de: (a) manter o rotor estável e suspenso, (b) manter o rotor fixo axialmente com precisão da ordem de $2\mu\text{m}$ a 50rpm e (c) realizar posicionamentos rápidos e precisos do rotor. Embora no presente protótipo a rigidez radial obtida não permita a sua aplicação prática, acredita-se que isto possa ser aprimorado otimizando-se as características dos ímãs permanentes. Isto será tema para trabalhos futuros.

Agradecimentos

Os autores expressam os seus agradecimentos ao Prof. Akira Shimokohbe do Tokyo Institute of Technology pela valiosas discussões. Este projeto é desenvolvido com auxílio da Fundação de Amparo à pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e do Electro Mechanical Technology Advancing Foundation (EMTAF, Japão).

REFERÊNCIAS

- Schweitzer, G., 1992, Mechatronics – A Concept with examples in Active Magnetic Bearings, Mechatronics, Vol.2, No.1, pp.65-74.
- Campbell, P., 1994, Permanent Magnet Materials and Their Applications, Vol.I, Cambridge University Press, p.191.
- Delamare, J., 1994, Suspensions magnétiques partiellement passives, Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, France.
- Earnshaw, S., 1939, On nature of molecular forces, Trans. Cambridge Philosophical Society, Vol.7 - Part 1, pp. 97 - 112.
- Mario-Péra, M.C. and Yonnet, J.P., 1994, Study of Permanent Magnet Arrangement for Superconducting Passive Bearings, IEEE Transaction on Magnetics, Vol.30, No.6, pp.4743-4745.
- Ohji, T., Mukopadhyay, S.C., Kuwahara, T. and Iwahara, M., 1996, Investigation of Configuration of Permanent Magnets on Repulsive Type Magnetic Bearing, Fifth Int. Simp. on Magnetic Bearings, pp. 485-490, Kanazawa, Japan.
- Yonnet, J.P., 1981, Permanent Magnet Bearing and Coupling, IEEE Trans. on Mag., Vol. 17, pp. 1169-1172.

AN 1-D.O.F. CONTROLLED ATTRACTION TYPE MAGNETIC BEARING

Abstract - *This paper presents a new type of magnetic bearing with active control only in axial direction. The bearing uses two pairs of permanent magnets working in attraction mode to restrict the radial motion and a control system composed of two electromagnets, a gap sensor and a controller to keep the axis in a fixed axial position. The principle, the dynamic model for axial motion and the control system for this bearing are presented. Finally, by experiments conducted in a prototype, it is shown the effectiveness of the conception here presented.*

Key-words: magnetic bearing, mechatronics, controlled bearing