



## 20º POSMEC

SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

# *Controle Ativo de Vibrações em Máquinas Rotativas Utilizando Mancais Magnéticos Ativos (MMAs)*

Edson Hideki KOROISHI  
Aldemir Aparecido CAVALINI Jr

Orientador:  
Valder STEFFEN Jr

Este trabalho tem o objetivo de desenvolver uma metodologia de controle ativo de vibrações utilizando mancais magnéticos ativos (MMAs). Para a obtenção do ganho do controlador foi utilizada a norma  $H_\infty$ . É de se destacar que o rotor utilizado neste estudo apresentou um elevado número de graus de liberdade (gdl), assim, para efetuar o controle do sistema foi necessário reduzir o modelo, sendo utilizado para isto o método Pseudo-Modal. A Fig. 1 apresenta o modelo do rotor utilizado.

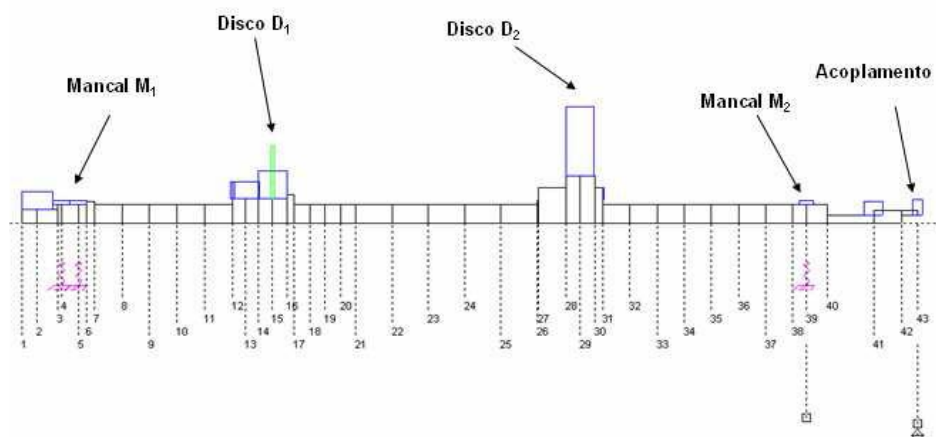


Figura 1: Modelo discretizado do rotor utilizado (Simões, 2006).

O rotor é composto por dois discos  $D_1$  e  $D_2$  e dois mancais de rolamento  $M_1$  e  $M_2$ . Destaca-se que a força de excitação era devido ao desbalanceamento do disco 2, posicionado no nó 29. O MMA foi posicionado no nó 36, sendo efetuado o controle apenas nos graus de liberdade de deslocamento nas direções  $x$  e  $z$ .

A Tabelas 1 e 2 apresenta as propriedades físicas do modelo apresentado pela Fig. (3).

Tabela 1. Características físicas do rotor.

| Característica            | Valor |
|---------------------------|-------|
| Massa do eixo (kg)        | 9,690 |
| Massa do disco $D_1$ (kg) | 2,032 |
| Massa do disco $D_2$ (kg) | 10,61 |
| Espessura de $D_1$ (m)    | 0,029 |
| Espessura de $D_2$ (m)    | 0,030 |
| Diâmetro do eixo (m)      | 0,040 |

Tabela 2. Características físicas dos mancais.

| Característica                           | Valor                 |
|------------------------------------------|-----------------------|
| $k_{x1}$ (N/m)                           | $1,16754 \times 10^8$ |
| $k_{z1}$ (N/m)                           | $1,65140 \times 10^8$ |
| $k_{x2}$ (N/m)                           | $1,40860 \times 10^6$ |
| $k_{z2}$ (N/m)                           | $1,43410 \times 10^6$ |
| $C_{x1}, C_{x2}, C_{z1}, C_{z2}$ (N.s/m) | 280, 120, 300, 120    |

Outras propriedades utilizadas para o eixo são: módulo de elasticidade  $210GPa$ , densidade do material  $7800kg/m^3$  e coeficiente de *Poison*  $0,3$ . Em termos do MMA utilizado, considerou-se um MMA de área de seção transversal  $1 \times 10^{-4} m^2$ , permeabilidade do ar ( $\mu_0$ )  $4\pi \times 10^{-7} Hm^{-1}$ , fator geométrico de correção  $0,8$ , corrente elétrica permanente  $1,5A$ , número de espiras 1000 e *gap*  $1 \times 10^{-3} m$ .

Na simulação do sistema controlado, o MMA era ligado apenas quando o deslocamento nos eixos  $x$  e  $z$  ultrapassavam  $2 \times 10^{-4} m$  no nó 36 que era o nó onde foi posicionado o MMA, região de deslocamento próximo ao ponto da velocidade crítica do sistema. A resposta do sistema foi obtida no domínio do tempo com o sistema acelerando de 0 a 5000 rpm em 60s. O ganho do controlador foi determinado utilizando norma  $H_\infty$  sendo esta resolvida por LMIs.

Boyd et al (1994) apresenta uma maneira de calcular a norma  $H_\infty$  utilizando LMIs. A norma  $H_\infty$  pode ser resolvida utilizando a o seguinte problema de otimização convexa:

$$\|G\|_{\infty} = \min \mu$$

$$\text{Sujeito à } \begin{bmatrix} A^T P + PA + C^T C & PB \\ B^T P & -\mu \end{bmatrix} < 0 \quad (1)$$

$$P > 0, \mu > 0$$

no qual  $\mu$  é escalar.

Para a simulação do sistema foi utilizado o simulink do software Matlab®.

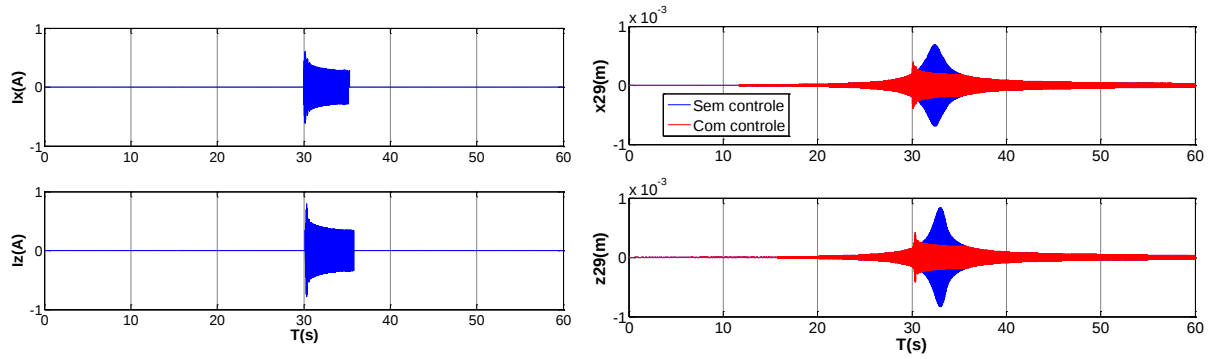


Figura 2: Corrente elétrica e resposta do sistema.

Para uma melhor análise do sistema controlado, calculou-se o valor *RMS* dos sinais de deslocamentos nas direções *x* e *z* do sistema controlado e sem controle, tais valores são apresentados pela Tabela 2.

Tabela 2. Valores *RMS* das respostas do sistema com e sem controle.

| GDL      | Sem controle (RMS)        | Com controle (RMS)        | Diferença (%) |
|----------|---------------------------|---------------------------|---------------|
| $x_{15}$ | $1,0314 \times 10^{-008}$ | $3,2380 \times 10^{-009}$ | 68,60         |
| $z_{15}$ | $1,2148 \times 10^{-008}$ | $3,2277 \times 10^{-009}$ | 86,49         |
| $x_{29}$ | $4,0298 \times 10^{-008}$ | $1,3678 \times 10^{-008}$ | 66,06         |
| $z_{29}$ | $4,9361 \times 10^{-008}$ | $1,4193 \times 10^{-008}$ | 72,29         |
| $x_{36}$ | $4,6459 \times 10^{-008}$ | $1,6535 \times 10^{-008}$ | 64,41         |
| $z_{36}$ | $5,7677 \times 10^{-008}$ | $1,7351 \times 10^{-008}$ | 69,92         |

Observa-se que o projeto proposto para o controle do rotor foi validado, visto que o MMA era para ser ligado quando o deslocamento tanto na direção *x* como na *z* ultrapassasse  $2 \times 10^{-4} m$  e atenuasse a resposta do sistema quando este passasse pela sua velocidade crítica, fato observado com os gráficos das Fig. 2.

## Referências

Boyd, S., Balakrishnan, V., Feron, E. El Ghaoui, L., “Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory”, Siam Studies in Applied Mathematics, USA, 1994, 193p.

Simões, R. C., Controle Modal Ótimo de um Rotor Flexível Utilizando Atuadores Piezelétricos do Tipo Pilha, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006, 133p.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
Faculdade de Engenharia Mecânica  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica  
[www.posgrad.mecanica.ufu.br](http://www.posgrad.mecanica.ufu.br)