

BALANCEAMENTO DE ROTORES FLEXÍVEIS SEM USAR MASSAS DE TESTE VIA OTIMIZAÇÃO

Manuel Villafañe Saldarriaga

Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC,
Av. João Naves de Ávila, 2160 –
Campus Santa Mônica - Uberlândia - MG
mavisa@mecanica.ufu.br

Valder Steffen Jr.

Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC,
Av. João Naves de Ávila, 2160 –
Campus Santa Mônica - Uberlândia - MG
vsteffen@mecanica.ufu.br

Resumo: Neste trabalho é estudada uma técnica de balanceamento de rotores flexíveis na qual não se usam massas de teste. A finalidade é poder atender a situações da indústria nos casos onde o uso de outras técnicas é proibitivo pelo tempo de parada da máquina, além dos tempos envolvidos na colocação e retirada das massas e, também, resolver situações onde características construtivas dificultam a instalação de tais massas. O princípio do método desenvolvido está na obtenção da resposta ao desbalanceamento do rotor flexível para, posteriormente, procurar reproduzi-la a partir de um modelo matemático-computacional do sistema rotor-mancais, considerando as massas de desbalanceamento e suas respectivas posições angulares como variáveis de projeto. Resolve-se, portanto um problema inverso e as massas encontradas são instaladas nos planos de balanceamento escolhidos, em posições angulares localizadas a 180 graus daquelas que foram identificadas. São feitas várias simulações computacionais, procurando evidenciar as vantagens da metodologia desenvolvida, assim como suas limitações.

Palavras-chave: Rotores, Balanceamento, Otimização, Modelo Inverso

1. INTRODUÇÃO

Classicamente, o problema do balanceamento de rotores flexíveis tem sido abordado pelo método dos coeficientes de influência ou pelo método modal, ou ainda por métodos híbridos baseados nestes dois anteriormente citados (Foiles et al, 1998). No método dos coeficientes de influência, usam-se massas de teste para determinar a sensibilidade do rotor, aplicando tais massas em planos de balanceamento e medindo a resposta do rotor (vibrações) nos chamados planos de medida. A partir da determinação desta sensibilidade, obtém-se as massas de correção para o sistema (Lacerda, 1990). No caso do método modal, inicialmente proposto por Bishop et al (1959), usa-se o fato de que o deslocamento do rotor, causado pelas forças de desbalanceamento, pode ser representado pela superposição dos vários modos de vibração. É utilizado um procedimento gradual, no qual se corrige o balanceamento em cada modo, começando do primeiro. Em cada etapa, o desbalanceamento modal residual, quer dizer, o desbalanceamento inicial no modo mais o efeito modal de qualquer correção feita nos modos inferiores, é determinado pela interpretação modal da vibração do rotor numa velocidade próxima da velocidade crítica correspondente. Em resumo, o procedimento modal consiste em balancear sucessivamente os modos do sistema rotor-

mancais, individualmente, com um conjunto de massas escolhidas para não perturbar os modos inferiores previamente balanceados (Vaqueiro, 1989).

As técnicas modernas para o balanceamento de rotores flexíveis tendem a reduzir o custo e o tempo envolvidos nos processos de balanceamento. Na prática, nas situações in situ, os rotores são normalmente balanceados com a ajuda do método dos coeficientes de influência, usando um computador ou uma calculadora programável. Neste caso, as sucessivas partidas e paradas e a montagem e desmontagem das massas de teste envolvem um tempo considerável.

Desde os anos 70 a otimização clássica tem sido usada para melhorar o desempenho dos métodos tradicionais de balanceamento de rotores flexíveis. Mais recentemente Lacerda e Steffen (1991) usaram o método de otimização de Davidon, Fletcher e Powell para calcular as massas de balanceamento, procurando a mínima energia de deformação total do sistema rotor mancais para uma velocidade escolhida. Hassan (1993) estudou um método para o balanceamento de rotores a partir de um modelo simplificado do rotor usando o método de otimização de Powell e minimizando as amplitudes de vibração nos planos de medida. Ono (1999), usou o método de otimização LMI (Linear Matrix Inequality) para melhorar o rendimento do método dos coeficientes de influência.

A identificação e correção de problemas dinâmicos em rotores flexíveis usando técnicas evolutivas de otimização é um campo novo de estudo, dado que o desenvolvimento destas técnicas é relativamente recente. A maioria dos estudos realizados é orientada para o controle ativo de vibrações produzidas pelo desbalanceamento (Zhou, 2001) ou à identificação de uma ou várias falhas num rotor (Nalinaksh et al, 2000). Xu et al (2000) apresentaram um método de balanceamento usando algoritmos genéticos para identificar o desbalanceamento e determinar as massas de correção e suas respectivas posições angulares.

Neste artigo é apresentada uma técnica para o balanceamento de rotores flexíveis usando algoritmos genéticos. A técnica usa as vibrações medidas inicialmente no rotor desbalanceado para serem comparadas com os deslocamentos nos planos de medida, estes obtidos através de um modelo de elementos finitos. São procuradas as massas de desbalanceamento e suas posições no modelo de elementos finitos que aproximem a resposta do modelo das vibrações medidas no rotor.

As massas de correção devem ser de valor idêntico ao das massas de desbalanceamento obtidas, devendo serem instaladas nas mesmas posições ao longo do eixo do rotor. Entretanto, a posição angular das massas de correção é defasada de 180 graus em relação às massas de desbalanceamento. A expectativa é a de que, através deste procedimento, seja possível minimizar as vibrações do rotor provocadas pelo desbalanceamento original na faixa de velocidades usada. Feita esta operação, compara-se o desbalanceamento residual com aquele definido por norma técnica específica.

2. MODELO MATEMÁTICO DO ROTOR

O modelo matemático usado no cálculo das forças de desbalanceamento, frequências naturais e modos de vibração do rotor é baseado no método dos elementos finitos. O modelo discreto do rotor pode ser representado por elementos de discos simétricos rígidos, vigas de Timoshenko, e mancais assimétricos com amortecimento viscoso.

O modelo completo do rotor é representado pela seguinte equação diferencial:

$$[M] \cdot \ddot{\delta} + [C(\Omega) + D] \cdot \dot{\delta} + [K] \cdot \delta = [F(t)] \quad (1)$$

As frequências naturais e os modos de vibração são obtidos da equação (1) para o caso homogêneo, através do cálculo dos autovalores e autovetores.

O efeito do desbalanceamento é obtido a partir da expressão da energia cinética da massa desbalanceada, e usando as equações de Lagrange é possível obter o modelo matemático do rotor afetado pelas forças de desbalanceamento:

$$[M] \cdot \ddot{\delta} + [C(\Omega) + D] \cdot \dot{\delta} + [K] \cdot \delta = F_1 \cdot \cos(\Omega \cdot t) + F_2 \cdot \sin(\Omega \cdot t) \quad (3)$$

Onde F_1 e F_2 são as amplitudes das excitações produzidas pelas massas desbalanceadas, e a solução da equação é dada por:

$$\delta = \Delta_1 \cdot \cos(\Omega \cdot t) + \Delta_2 \cdot \sin(\Omega \cdot t) \quad (4)$$

Os termos Δ_1 e Δ_2 são obtidos a partir da equação 5 para diferentes velocidades de rotação:

$$\begin{bmatrix} [K] - [M] \cdot \Omega^2 & -\Omega \cdot [C(\Omega) + D] \\ \Omega \cdot [C(\Omega) + D] & [K] - [M] \cdot \Omega^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3. ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO

Existem situações em que os métodos clássicos de otimização apresentam dificuldades de convergência quando são utilizados na resolução de problemas de engenharia, particularmente no caso de problemas inversos (Assis, 1999). Os métodos clássicos não têm a capacidade de ter uma perspectiva global do problema, convergindo com frequência para mínimos locais. Outra dificuldade observada é a impossibilidade de serem usados eficientemente para desenvolvimentos usando técnicas de computação paralela. Os problemas foram reduzidos a partir do momento em que se passou a associar técnicas de otimização com ferramentas de Inteligência Artificial, mais especificamente, com ferramentas de busca heurística. De fato, os algoritmos heurísticos, que se caracterizam pela sua flexibilidade e robustez, têm como objetivo encontrar soluções de boa qualidade num tempo computacional aceitável.

Neste trabalho os algoritmos Genéticos foram aplicados para o cálculo das massas de desbalanceamento, partindo das vibrações medidas no rotor. As vibrações medidas no rotor são comparadas às obtidas a partir de um modelo do rotor construído pelo método dos elementos finitos. A função objetivo neste caso é o erro médio quadrático entre as vibrações medidas no rotor e as obtidas a partir do modelo. O procedimento para a identificação dos desbalanceamentos segue o diagrama mostrado no anexo 1.

4. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Com o intuito de testar o procedimento de balanceamento apresentados nas seções anteriores, ambos o método é simulado usando o modelo de rotor mostrado na fig. 1. As propriedades geométricas e físicas dos elementos são apresentadas nas tab. 1, 2, e 3. O material dos elementos de eixo e do disco é o aço ($E = 2.067 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ e $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$).

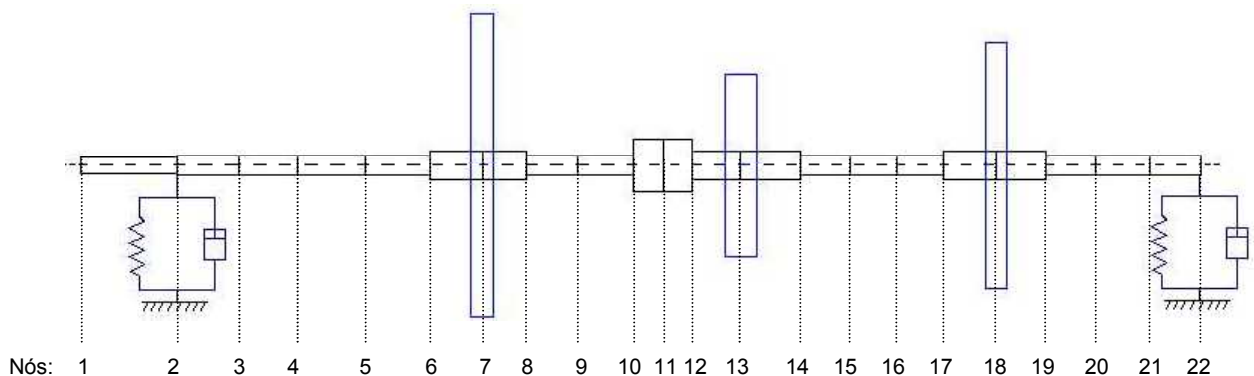


Figura 1 – Modelo de Rotor discretizado por elementos finitos

Tabela 1- Elementos do Tipo Eixo

ELEMENTOS DE EIXO				
NÚMERO	NÓS		COMPRIMENTO [m]	DIÂMETRO [m]
1	1	2	0.048	0.004
2	2	3	0.03	0.005
3	3	4	0.029	0.005
4	4	5	0.033	0.005
5	5	6	0.032	0.005
6	6	7	0.026	0.007
7	7	8	0.022	0.007
8	8	9	0.025	0.005
9	9	10	0.027	0.005
10	10	11	0.015	0.0125
11	11	12	0.014	0.0125
12	12	13	0.024	0.007
13	13	14	0.029	0.007
14	14	15	0.025	0.005
15	15	16	0.023	0.005
16	16	17	0.023	0.005
17	17	18	0.026	0.007
18	18	19	0.024	0.007
19	19	20	0.025	0.005
20	20	21	0.026	0.005
21	21	22	0.026	0.005

Tabela 2 – Elementos do Tipo Disco

ELEMENTOS DE DISCO			
NÚMERO	NÓ	ESPESURA [m]	DIÂMETRO [m]
1	7	0.0112	0.075
2	13	0.0157	0.045
3	18	0.0107	0.06

Tabela 3 – Elementos do Tipo Mancal

ELEMENTOS DE MANCAL					
NÚMERO	NÓ	KX [N/m]	KZ [N/m]	CX [N.s/m]	CZ [N.s/m]
1	2	18750	10750	10.5	12
2	22	14770	24770	10.5	12

As velocidades críticas do modelo são mostradas na tab. 4.

Tabela 4. – Velocidades Críticas

MODOS CORRESPONDENTES	1	2	3	4	5	6
VELOCIDADE CRÍTICA [rpm]	639.54	696.05	1120.50	1214.20	2704.30	3029.30

4.1. Simulação do Método de Balanceamento Baseado em Otimização Usando Algoritmos Genéticos

Foram efetuadas simulações aplicando os dois métodos baseados em técnicas de otimização descritos no capítulo anterior. No caso do método baseado nos Algoritmos Genéticos, optou-se por utilizar um programa já disponível. O programa utilizado foi o GAOT Versão 5 (*The Genetic*

Algorithm Optimization Toolbox for Matlab 5). O GAOT foi desenvolvido por Joines *et al* (1996) no College of Engineering – North Carolina State University – EUA, sendo este programa um software de livre acesso. Os parâmetros usados no algoritmo são listados na tab. 5.

Tabela 5. – Parâmetros do Algoritmo Genético

Parâmetros do Algoritmo Genético Usado		
Tipo de Algoritmo	Ponto Flutuante	
Critério de Parada	Número Máximo de Gerações	50 Gerações
Função de Seleção	Seleção Dependendo da Probabilidade Cumulativa	
Operadores Genéticos	Cruzamento simples	Taxa de Cruzamento=0.6
	Mutação Uniforme	taxa de mutação = 0.05
Numero de Elementos da população inicial	500 Indivíduos	

A norma ISO 11342 recomenda para o caso em que se deseja balancear um rotor flexível em uma faixa em que estão incluídas n velocidades críticas, considerar pelo menos n ou, sendo possível, $(n+2)$ planos de correção. Seguindo estas indicações foram efetuadas simulações para o rotor da figura (5.1) usando, em um primeiro problema, três planos de medida e três planos de correção. Em ambos os casos, os planos correspondem às posições dos nós 7, 13, 18 (posições dos discos), usando velocidades de balanceamento entre 500 e 1500 rpm com intervalos de 100 rpm. Em um segundo problema, são usados os mesmos três planos de medida e unicamente dois planos de correção (nós 7, e 13). Foram usadas velocidades entre 500 e 1000 rpm com intervalos de 100 rpm.

Na tab. 6., são comparadas as massas inicialmente dispostas e as determinadas através do método acima apresentado.

Tabela 6. – Comparação entre as massas iniciais de Desbalanceamento e as determinadas através do Algoritmos Genéticos

Nó		Desbalanceamentos		
		Inicial	Determinado no primeiro problema	Determinado no segundo problema
7	Massa [kg]	0.003	0.00311	0.0024
	Ângulo	150.00°	153.04°	70.29°
13	Massa [kg]	0.006	0.0068	0.0036
	Ângulo	30.00°	29.07°	286.50°
18	Massa [kg]	0.005	0.005	---
	Ângulo	290.00°	285.67°	---
Redução da Amplitude do Deslocamento			95.20%	45.50%

Na Fig. 2. é mostrada a resposta ao desbalanceamento depois de colocadas as massas de correção correspondentes para o primeiro problema abordado. Para isso, as massas obtidas no processo foram instaladas em posições angulares desfasadas de 180° das posições obtidas pelo procedimento acima descrito.

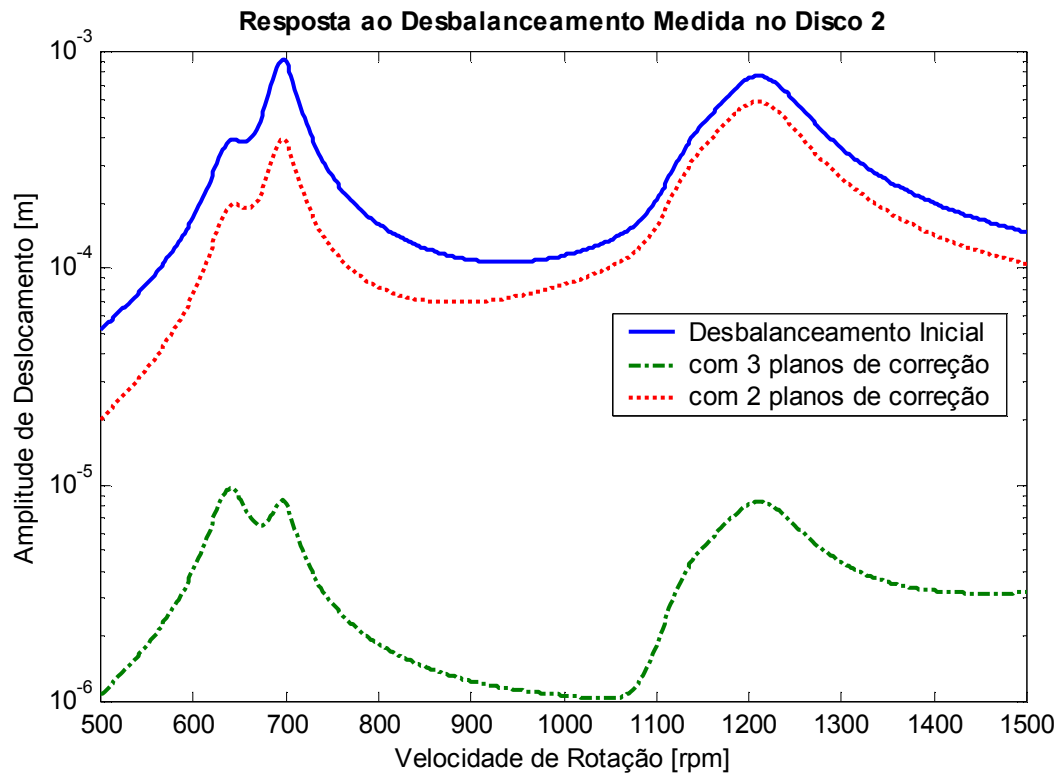


Figura 2. – Resposta ao Desbalanceamento

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudada uma técnica de balanceamento de rotores flexíveis sem usar massas de teste. Trata-se de determinar o desbalanceamento do rotor, para depois tomar as medidas corretivas adequadas usando as vibrações medidas inicialmente no rotor desbalanceado para serem comparadas com os deslocamentos nos planos de medida, estes obtidos através de um modelo de elementos finitos. Usando Algoritmos Genéticos é determinado o desbalanceamento equivalente nas velocidades consideradas.

Mediante simulações computacionais foi testada a eficiência dos métodos em diferentes situações, demonstrando sua viabilidade, porém, sendo necessários ensaios experimentais para confirmar sua aplicabilidade prática.

Os algoritmos genéticos oferecem a possibilidade de se trabalhar em uma faixa de várias velocidades sem adicionar um custo computacional proibitivo, o que permite corrigir o desbalanceamento para várias velocidades críticas simultaneamente. São sempre consideradas as recomendações da norma ISO 11342 com relação ao número de planos de correção utilizado.

O passo seguinte deste trabalho é fazer a validação experimental dos métodos estudados. Deve-se salientar que a bancada experimental disponibilizada para esta pesquisa apresentou problemas de amortecimento excessivo dos modos de vibração necessários. Este problema deverá ser corrigido oportunamente.

Também é preciso fazer estudos comparativos entre as diferentes variáveis que influem no Algoritmo Genético, tais como: número adequado de gerações, número de indivíduos, relação entre os valores da função objetivo e o grau de eficiência do balanceamento, etc.

4. AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à CAPES pelo apoio financeiro, sem o qual não seria possível a realização deste trabalho de pesquisa, à FAPEMIG por permitir a continuação deste, e à FEMEC pelo apoio tecnológico e humano.

4. REFERÊNCIAS

- Assis, E., 1999, “Uso De Técnicas De Otimização Para Auxiliar O Projeto E Identificar Parâmetros De Máquinas Rotativas”, Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia –MG, Brasil.
- Bishop, R.E.D., Glandell, G.M.L., 1959, “the vibration and balancing of an unbalanced flexible rotor”, *Journal of mechanical Engineering Science*, 1, pp. 66-77.
- Hassan G., 1995, “New Approach for Computer-Aided Static and Dynamic Balancing of Rigid Rotors”. *Journal of Sound and Vibration*, pp. 649-661.
- International Organization For Standardization, 1998, ISO 11342, “Methods And Criteria For The Mechanical Balancing Of Flexible Rotors”.
- Joines J., Houck C., E Kay M., 1996, “A Genetic Algorithm for Function Optimization: A Matlab Implementation”, North Carolina State University, Raleigh, NC.
- Lacerda, H., 1990, “Racionalização do Método dos Coeficientes de influência Aplicado ao Balanceamento de Rotores Flexíveis”, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia –MG, Brasil.
- Nalinaksh S., Satishkumar D., 2001, “Artificial Neural Networks Design for fault identification in a Rotor-Bearing Systems”, *Mechanism and Machine Theory*, (36), pp. 157-175.
- Ono, K., 1999, “Rotor Balancing Method Using LMI Optimization”, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (Edit C)*, Vol 65, No 634, pp. 2218-2225.
- Vaqueiro, J.; 1989, “Balanceamento de Rotores Flexíveis”, Tese de Mestrado, UNICAMP, Campinas – SP, Brasil.
- Xu, B, Qu, L., Sun, R., 2000, “The Optimization Technique-Based Balancing of Flexible Rotors Without Test Runs”, *Journal of Sound And Vibration*, 238: pp. 877-892.
- Zhou, S., 2001, “Active Balancing and Vibration Control of Rotating Machinery: A Survey”, *The Shock and Vibration Digest*, September, pp. 361-371.

5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

BALANCING OF FLEXIBLE ROTORS WITHOUT TRIAL WEIGHTS BY USING OPTIMIZATION TECHNIQUES

Manuel Villafañe Saldarriaga

Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC,
Av. João Naves de Ávila, 2160 –
Campus Santa Mônica - Uberlândia - MG
mavisa@mecanica.ufu.br

Valder Steffen Jr.

Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC,
Av. João Naves de Ávila, 2160 –
Campus Santa Mônica - Uberlândia - MG
vsteffen@mecanica.ufu.br

Abstract: The present work presents a flexible-rotor balancing procedure that does not use trial weights. The goal of this approach is to help in situations found in the industrial context, in which trial weight based techniques cannot be applied. A few reasons can be mentioned: the time consumed to stop the machine to install the weights and start-up again to accelerate the rotor to the balancing rotation for several times is prohibitive; technical reasons may make difficult the work of installing the trial weights. The actual balancing technique is based on pseudo-random optimization methods. In this research work the genetic algorithm optimization method was explored. The basic idea is to obtain the flexible rotor unbalance response, which is then mimicked by using a FEM model in which the unbalance masses and their corresponding angular positions are the design variables in the optimization run. This way, an inverse problem is solved and the masses obtained are installed in previously chosen balancing planes at inverted angular positions. Numerical simulations show the efficiency and limitations of the methodology developed.

Keywords: rotodynamics, balancing, flexible rotor, inverse problems, optimization.

Anexo 1

Procedimento de identificação do desbalanceamento usando Algoritmos Genéticos:

