



Identificação de falhas de ovalização em mancais hidrodinâmicos

Aluno: Matheus Victor Inacio

Orientadora: Profa. Dra. Kátia L. Cavalca Dedini

Coorientador: Prof. Dr. Gregory Bregion Daniel

Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP

Financiamento do projeto: FAPESP

1. Introdução

Este projeto de iniciação científica tem por objetivo desenvolver um método robusto e eficiente para a detecção de falhas por ovalização em mancais hidrodinâmicos e, com isso, realizar também a identificação da magnitude de ovalização (k) e ângulo da ovalização (α) no mancal.

De forma geral, uma técnica de diagnose e identificação da falha baseado em modelo é aplicado neste trabalho, sendo que o objetivo principal é comparar as respostas obtidas em modelos numéricos com as respostas físicas da máquina durante a condição de operação e, assim, permitir a detecção de possíveis falhas e identificação dos parâmetros de falhas que alteram o comportamento dinâmico da máquina rotativa. É importante ressaltar ainda que, no presente estágio de desenvolvimento dessa pesquisa, as simulações computacionais realizadas para a detecção e identificação da falha utilizou resposta simuladas no domínio do tempo como resposta de referência da máquina. Após assegurar a elevada robustez e eficiência da metodologia proposta, testes experimentais são então previstos para a validação dos resultados obtidos nessas simulações computacionais.

2. Metodologia

2.1. Modelo numérico do sistema rotor-mancal

Uma vez que o método de detecção de falha é baseado em modelo torna-se então imprescindível a obtenção de um modelo numérico do sistema rotor-mancal capaz de simular as falhas de ovalização no mancal hidrodinâmico. Assim, o modelo de falha de ovalização proposto por Silveira e Daniel (2019) é adotado, sendo os parâmetros da ovalização definidos pela magnitude de ovalização (k) e ângulo de ovalização (α), conforme mostrado na Figura 1.

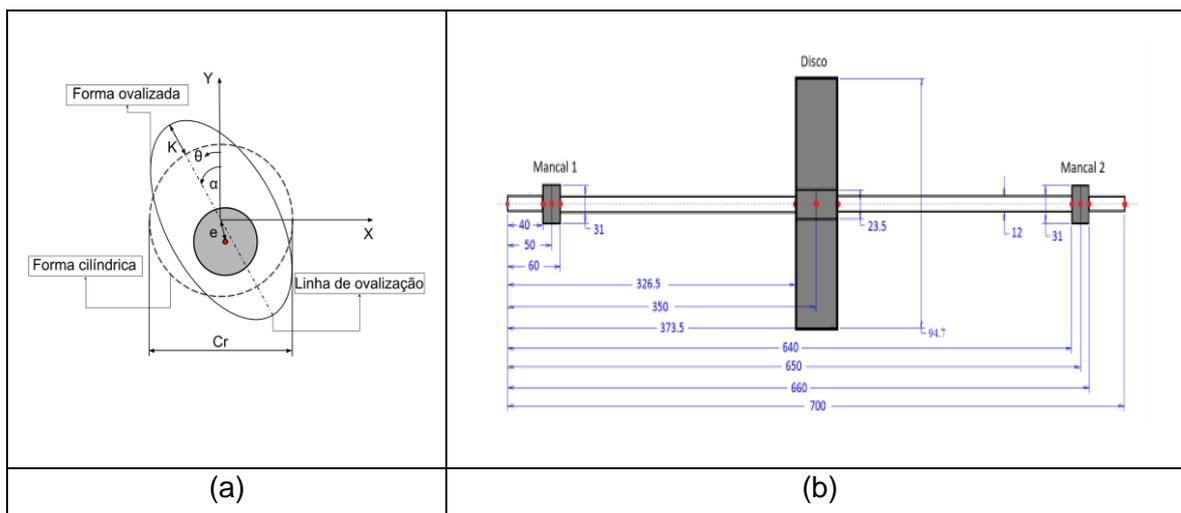


Figura 1: Modelo numérico simulado neste trabalho: (a) Representação esquemática do mancal ovalizado; (b) Representação esquemática do Sistema Rotativo

A partir da equação da espessura de filme de óleo proposta por Silveira e Daniel (2019) torna-se possível então resolver numericamente a equação clássica de Reynolds (1886) e, com isso, determinar a distribuição de pressão e as forças hidrodinâmicas resultantes em mancais com ovalização.

Com base nas pequenas amplitudes de vibração (órbita do rotor), as forças hidrodinâmicas do filme de óleo do mancal podem ser linearizadas ao redor da posição de equilíbrio do rotor, sendo então escritas através de coeficientes equivalentes de rigidez e amortecimento, conforme proposto por Lund (1987). Vale destacar que, essa abordagem linear por coeficientes tende a facilitar o cálculo das forças e, conseqüentemente, a resolução da equação de movimento do sistema rotativo, reduzindo o custo computacional das simulações numéricas.

As forças hidrodinâmicas linearizadas do mancal ovalizado são introduzidas na equação de movimento do sistema rotativo através do vetor de forças externas, juntamente com a força peso e a força de desbalanceamento, permitindo assim obter as respostas dinâmicas do rotor no domínio do tempo considerando os efeitos da falha de ovalização no mancal hidrodinâmico.

O sistema rotativo considerado nesse trabalho é um rotor Laval, conforme apresentado na Figura 1(b). Esse rotor foi modelado através do Métodos dos Elementos Finitos (MEF), considerando elementos de disco rígido e elementos de viga de Timoshenko.

Após a simulação dinâmica do rotor, a resposta temporal é então transformada para o domínio da frequência em coordenadas direcionais, a partir da Transformada Rápida de Fourier – FFT (FullSpectrum da resposta temporal). Assim, torna-se possível avaliar as coordenadas direcionais forward (*rf*) e backward (*rb*), que representam parâmetros mais sensíveis às falhas de ovalização do mancal e, conseqüentemente, mais efetivos em um método de detecção deste tipo de falha.

Além das coordenadas forward e backward, o formato da órbita do rotor no interior do mancal, (a saber, raio máximo, raio mínimo e ângulo da órbita) é também utilizado como parâmetros para

a identificação da falha de ovalização. Tais parâmetros podem ser calculados utilizando as coordenadas direcionais, conforme proposto por Lee (1993).

2.2. Métodos de busca aplicado a identificação da ovalização

A detecção e identificação de falhas pode ser realizada a partir de métodos do tipo busca por gradiente ou do tipo busca dicotômica, sendo este último o método apresentado neste trabalho. Os métodos de busca dicotômicos são ferramentas numéricas que realizam a busca da raiz de uma função através da comparação entre duas possibilidades distintas a cada iteração, selecionando a que estiver mais próxima da raiz.

A busca dicotômica utilizada para identificação da ovalização é o método da bissecção, o qual deverá ser bidimensional visto que os parâmetros utilizados nas buscas são dependentes de duas variáveis da falha, o ângulo α e a magnitude k da ovalização no mancal.

O método da bissecção bidimensional é uma generalização do método da bissecção unidimensional, no qual divide-se um intervalo inicial na metade e determina-se o lado que possui o zero da função, tornando este lado o intervalo para a próxima iteração. Entretanto, no caso bidimensional forma-se inicialmente um retângulo primário, a partir da definição dos intervalos iniciais de cada uma das variáveis. Em seguida, divide-se cada uma das dimensões ao meio, repartindo o retângulo inicial em quatro retângulos menores de dimensões congruentes, como pode ser visto na Figura 2. Uma vez obtido os quatro retângulos, calcula-se o valor da função erro em cada um dos vértices dos retângulos. Aqueles que apresentam erros com sinais iguais em todos os quatro vértices, para pelo menos um dos parâmetros utilizados, são eliminados da busca, enquanto que o restante continua sendo subdividido em novos quatro quadrantes, repetindo-se a mesma análise de seleção dos retângulos a cada iteração (Menezes, 2015).

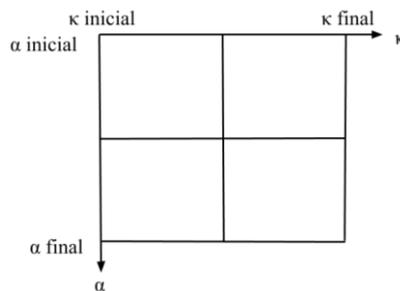


Figura 2: Representação esquemática do método da bissecção bidimensional

Esses métodos de busca consideram uma função erro dos parâmetros de resposta (amplitude forward, amplitude backward, raio máximo, raio mínimo e ângulo da órbita) em relação aos parâmetros de entrada que se deseja identificar (magnitude e ângulo de ovalização). Assim, a função erro é dada pela diferença relativa entre os parâmetros da resposta de referência (sinal medido na máquina) e os parâmetros da resposta da resposta simulada com base nos parâmetros de ovalização (k , α) de cada vértice.

Durante o desenvolvimento deste método de busca percebeu-se a necessidade de incrementar características intrínsecas a este problema no método da bissecção descrito anteriormente para que a identificação da ovalização torna-se eficiente e robusta. A primeira delas é a não eliminação de quadrantes durante a primeira iteração, mesmo que todos os vértices tenham sinais iguais. Isto é necessário porque as respostas do sistema rotativo utilizadas como parâmetros de busca, embora sensíveis à ovalização, não apresentam comportamento suaves e previsíveis. Assim, dado que a área inicial de busca (k : 0,5-15% da folga radial e α : 0 a 90°) é muito abrangente, pode-se equivocadamente eliminar o quadrante que possui a solução.

A segunda característica intrínseca a este método de busca da ovalização está relacionada ao critério de parada. Diferente do que foi proposto por Menezes (2015), o critério de parada deste método é baseado na relação do tamanho da aresta com o centroide da variável k de cada quadrante. Assim, o algoritmo é interrompido quando todos os quadrantes apresentarem essa relação (aresta/centroide) menor que 1%. Isto garante que o quadrante seja suficientemente pequeno em relação à ordem de grandeza das variáveis da ovalização, tornando a solução mais robusta e confiável. É válido ressaltar também, que a variável k (magnitude) foi escolhida para este processo por assumir maiores valores dessa relação (aresta/centroide), visto que os centroides dela assumem menores valores durante a busca.

Por fim, após finalizar essa etapa de eliminação dos quadrantes, é comum restar ainda mais de um quadrante como solução. A fim de determinar qual destes quadrantes contém a melhor solução, soma-se o valor médio das funções erros do forward e do backward (os parâmetros mais sensíveis à ovalização) para cada quadrante. Desta forma, o quadrante que apresenta a menor soma, representa o quadrante que contém a possível solução, que, no caso, se refere ao valor do centroide do quadrante.

3. Resultados

Com o intuito de avaliar a metodologia proposta foram realizados 16 análises de identificação de falha, considerando condições de falha (k e α) bem distribuídas ao longo do domínio inicial de busca, que é dada por: k : 0,5-15% da folga radial do mancal e α : 0 a 90°. Os critérios de avaliação do método de identificação de falha são baseados nos erros percentuais dos valores de k e α identificados em relação com os valores adotados nas simulações, além também do número de iterações e do tempo de busca.

Com base na Tabela 1 é possível notar que o algoritmo de busca dicotômica desenvolvido para identificação da ovalização de mancais hidrodinâmicos obteve resultados muito promissores, visto que a maioria das análises realizadas apresentaram erros abaixo de 1%, o que indica a boa robustez e precisão do método. Além disso, percebe-se que a medida que a deformação do mancal aumenta, ou seja, conforme a variável k aumenta, a busca torna-se mais eficiente, considerando que o número de iterações e o tempo de busca decaem. Tal comportamento mostra-se coerente,

visto que as assinaturas de falhas nos sinais de resposta do rotor tornam-se mais visíveis para condições mais críticas (elevadas) de ovalização.

Tabela 1: Resultados do método de busca da bissecção aplicado ao problema da ovalização

k (%) adotado	k (%) identificado	Erro (%)	α (°) adotado	α (°) identificado	Erro (%)	Nº iterações	Tempo (h)
3	2,98	-0,73	0	0,09	-	9	10,00
3	2,92	-2,62	30	31,38	4,59	9	20,97
3	3,01	0,21	60	60,03	0,05	9	33,46
3	2,95	-1,68	90	89,56	-0,49	9	26,68
6	6,02	0,37	0	0,18	-	8	10,57
6	6,02	0,37	30	30,06	0,20	8	12,79
6	6,02	0,37	60	59,94	-0,10	8	13,48
6	6,02	0,37	90	89,47	-0,59	8	10,97
9	8,97	-0,35	0	0,18	-	8	9,31
9	9,02	0,27	30	30,06	0,20	8	8,75
9	8,94	-0,67	60	60,12	0,20	8	8,37
9	9,02	0,27	90	89,82	-0,20	8	9,04
12	11,88	-0,96	0	0,35	-	7	7,76
12	11,99	-0,01	30	29,88	-0,39	7	6,61
12	11,88	-0,96	60	60,82	1,38	7	6,03
12	11,99	-0,01	90	89,65	-0,39	7	7,50

4. Conclusão

A partir das análises realizadas neste trabalho foi possível concluir que o método proposto para identificação de falhas por ovalização mostra-se muito promissor, devido sua significativa eficiência e robustez, que resultou erros nos parâmetros identificados abaixo de 5%. Diante disso, a inclusão desse método em sistemas de diagnose de falhas permite realizar um melhor monitoramentos de máquinas rotativas, reduzindo assim a ocorrência de acidentes, as paradas inesperadas no sistema produtivo e, conseqüentemente, perdas econômicas de produção.

5. Referências bibliográficas

- LEE, C.W. “Vibration Analysis of Rotors”. 1.ed. Dordrecht / Boston / London: Kluwer Academic Publishers, 1993, pp. 44-45.
- MENEZES, M., “Cálculo Numérico”. Laureate- International Universities, 2015, pp.22-26.
- REYNOLDS, O. “On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp Tower’s experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil”, Proc. Royal Soc. Lond., 1886, 40, pp. 191-203.
- SILVEIRA, A.R.G.; DANIEL, G.B. “Influence of bearing ovalization in the dynamic of a planar slider-crank mechanism”. Applied Mathematical Modelling, 2019, 66, pp.175-194.
- LUND, J.W. Review of the concept of dynamic coefficients for fluid film journal bearings, J. Tribol. 109 (1987) 37–41, doi: 10.1115/1.3261324.