

# DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS DE OVALIZAÇÃO EM MANCAIS HIDRODINÂMICOS

Palavras-Chave: Mancal hidrodinâmico, Identificação de falhas, Ovalização

Autores/as:

Matheus Victor Inacio [UNICAMP]

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Kátia L. Cavalca (Coorientadora) [UNICAMP]

Prof. Dr. Gregory Bregon Daniel (Orientador) [UNICAMP]

## 1. INTRODUÇÃO

Considerando a demanda por sistemas de monitoramento eficazes para identificar falhas precocemente em máquinas rotativas, este trabalho visa desenvolver um método para detectar e identificar falha de ovalização em mancais hidrodinâmicos, que representa uma das principais fontes de falhas em máquinas rotativas. A partir deste método busca-se detectar a falha de ovalização e identificar os parâmetros de falha, a saber:  $k$  (magnitude de deformação) e  $\alpha$  (ângulo de ovalização). Assim, uma técnica de identificação de falha baseada em modelo foi empregada a fim de estimar os parâmetros de falhas, sendo que as características extraídas da resposta de vibração da máquina são utilizadas para comparar com as características das respostas simuladas a partir do modelo matemático da máquina.

## 2. METODOLOGIA

Visto que o método de identificação de falha proposto é baseado em modelo, é de suma importância obter um modelo robusto do sistema rotativo, que seja capaz de simular a resposta dinâmica do rotor sob efeito da falha de ovalização nos mancais. A Figura 1a apresenta o sistema rotor-mancais utilizado neste trabalho.

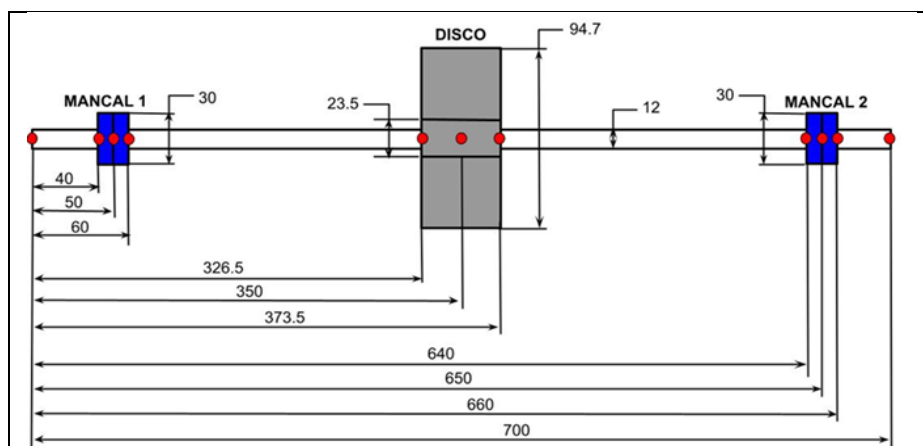


Figura 1a – Sistema rotor-mancais

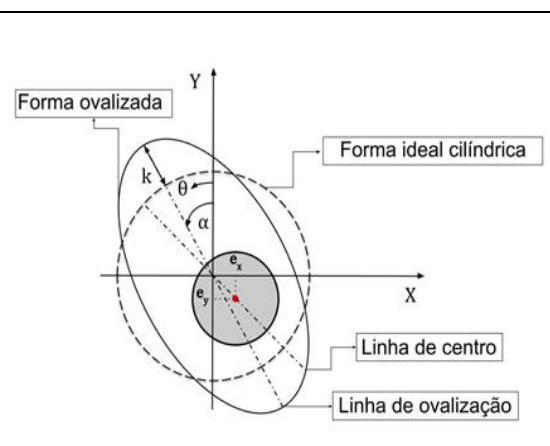


Figura 1b – Mancal ovalizado

No sistema rotativo apresentado na Figura 1a, o rotor foi modelado através do Método dos Elementos Finitos (MEF) considerando elementos de viga de Timoshenko e elementos de disco rígido (Nelson, 1980). Já os mancais hidrodinâmicos com falhas de ovalização foram modelados com base na equação clássica de Reynolds e no modelo de ovalização proposto por Silveira e Daniel (2019), que assume o perfil do mancal ovalizado como elíptico e cuja solução é realizada através do Métodos de Volumes Finitos (MVF). A Figura 1b apresenta um desenho esquemático do perfil de um mancal ovalizado, onde são apresentados os parâmetros da falha de ovalização  $k$  e  $\alpha$ , os quais representam a amplitude de deformação e o ângulo de ovalização, respectivamente.

A Equação (1) apresenta a equação da espessura de filme de óleo do mancal ovalizado e a Equação (2) apresenta a equação clássica de Reynolds.

$$h(\theta) = Cr + e_x \text{sen}(\theta) - e_y \text{cos}(\theta) + k \text{cos}(2\theta - \alpha) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\mu U \frac{dh}{dx} + 12\mu \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

em que  $h$  representa a espessura do filme de óleo em função de  $\theta$ , coordenada angular que inicia-se no eixo de referência Y, que passa pelo centro do mancal. Enquanto que  $Cr$  é a folga radial do mancal,  $k$  representa a magnitude de deformação,  $\alpha$  representa o ângulo de ovalização e  $e_x$  e  $e_y$  representam, respectivamente, as componentes em X e Y da excentricidade ( $e$ ). Já  $p$  representa o campo de pressão,  $\mu$  a viscosidade do óleo lubrificante,  $U$  a velocidade linear da superfície do eixo e (X,Z) as coordenadas do domínio do mancal.

A partir da equação da espessura de filme de óleo proposta por Silveira e Daniel (2019), resolve-se a equação clássica de lubrificação de Reynolds (1886) por meio do Método dos Volumes Finitos (MVF), permitindo assim determinar a distribuição de pressão e calcular as forças hidrodinâmicas resultantes. Ressalta-se que, com base nas pequenas amplitudes de vibração do rotor no interior do mancal (órbita do rotor), as forças hidrodinâmicas são 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).

A Equação (3) mostra a equação de movimento do sistema rotativo suportado por mancais hidrodinâmicos:

$$[M_G]\{\ddot{q}\} + ([C_G] + \Omega[G_G])\{\dot{q}\} + [K_G]\{q\} = \{F_h\} + \{F_p\} + \{F_d\} \quad (3)$$

onde  $[M_G]$ ,  $[C_G]$ ,  $[G_G]$  e  $[K_G]$  são, respectivamente, as matrizes globais de inércia, amortecimento, giroscópica e de rigidez. Enquanto que  $\{F_h\}$ ,  $\{F_p\}$  e  $\{F_d\}$  representam os vetores de força externa das forças hidrodinâmicas dos mancais, da força peso do rotor e da força de desbalanceamento, responsável por excitar o sistema rotativo. Por fim,  $\{\ddot{q}\}$  é a aceleração do vetor global dos graus de liberdade,  $\{\dot{q}\}$  é a velocidade do vetor global dos graus de liberdade e  $\{q\}$  o deslocamento do vetor global dos graus de liberdade.

Com as forças hidrodinâmicas linearizadas introduzidas na equação de movimento do sistema rotativo por meio do vetor de forças externas, torna-se possível obter a resposta temporal considerando a ovalização dos mancais. Em seguida, a resposta temporal permanente é transformada para o domínio da frequência através da Transformada Rápida de Fourier (FFT), obtendo o *FullSpectrum* da resposta nas coordenadas físicas (X,Y). Por fim, realiza-se então uma transformação de coordenadas, obtendo assim as coordenadas direcionais diretas e retrogradadas da resposta do rotor (Mendes, 2016).

A fim de obter as características da resposta dinâmica do rotor, as amplitudes  $rf$  e  $rb$  nas frequências  $1x$  e  $-1x$  do espectro de frequência das coordenadas direcionais são avaliadas (Oliveira et al. (2021), visto que são os parâmetros da resposta dinâmica do rotor mais sensíveis à ovalização. A partir desses parâmetros direcionais (amplitude e fase), obtém-se também o ângulo de inclinação ( $\phi$ ) da órbita do eixo no interior do mancal, conforme proposto por Lee (1993).

Desta forma, utiliza-se essas características da resposta dinâmica, nomeadamente como parâmetros de resposta  $rf$ ,  $rb$  e  $\phi$ , para identificar a falha de ovalização. Assim, definindo as funções de erro com base na diferença relativa entre os parâmetros da resposta de referência medida na máquina e os parâmetros da resposta simulada, aplica-se então o método de busca de raiz por gradiente (método de Newton-Raphson) para encontrar o zero destas funções e, conseqüentemente, identificar os valores dos parâmetros de falha  $\kappa$  e  $\alpha$ .

## 2.1 Método de Newton-Raphson

Os métodos de busca por gradiente representam uma alternativa viável, pois podem convergir com um menor número de iterações se assumido uma boa estimativa inicial (Menezes, 2015). Dentre os métodos de busca por gradiente, o método de Newton-Raphson é o mais conhecido e aplicado para resolução de equações não lineares. A grande vantagem deste método é sua velocidade de convergência, caracterizada por ser localmente quadrática (Sassi, 2010). Assim, a aplicação do método de Newton-Raphson para a identificação da falha de ovalização é muito interessante para obter uma melhor velocidade de convergência.

A equação base do método de Newton-Raphson é apresentada na Equação 4.

$$\{X\}^{(i+1)} = \{X\}^{(i)} - [J(\{X\}^{(i)})]^{-1} \{f(\{X\}^{(i)})\} \quad (4)$$

onde  $\{X\}^{(i)}$  é o vetor com as variáveis de interesse  $\alpha$  e  $\kappa$  da iteração  $i$  e  $\{X\}^{(i+1)}$  o vetor da iteração  $(i + 1)$ . Já  $\{f(\{X\}^{(i)})\}$  é o vetor das funções erro da iteração  $i$  e  $[J(\{X\}^{(i)})]$  é a matriz jacobiana, composta pelas derivadas parciais das funções de erro em relação as variáveis de interesse na iteração  $i$ .

Neste caso, o vetor  $\{f(\{X\}^{(i)})\}$  das funções de erro é composto pelas funções de erro das amplitudes do espectro de frequência das coordenadas direcionais em  $1x$  ( $rf$ ) e  $-1x$  ( $rb$ ) e o ângulo de inclinação da órbita ( $\phi$ ). É importante mencionar ainda que as derivadas parciais da matriz jacobiana são calculadas pelo Método de Diferenças Finitas (MDF).

Devido a importância da estimativa inicial para a convergência do método de Newton-Raphson, uma estratégia *multi-start* tem sido adotada, onde nove estimativas iniciais igualmente espaçadas ao longo do domínio de busca são consideradas. Inicialmente, as normas quadráticas do vetor  $\{f(\{X\}^{(i)})\}$  são calculadas para essas nove estimativas iniciais, sendo que o processo de busca se inicia na estimativa com a norma mais baixa. Se o critério de parada não for atingido em 20 iterações, um novo processo de busca é reiniciado a partir da estimativa com a segunda norma mais baixa, e assim sucessivamente. A convergência do método numérico é considerada quando o módulo das funções de erro é menor que  $7,5 \cdot 10^{-3}$  e os parâmetros  $\kappa$  e  $\alpha$  têm uma variação menor que 0,075% e 0,75%, respectivamente.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após devidamente implementado a abordagem proposta, realiza-se então testes de identificação da falha de ovalização nos mancais. Os resultados apresentados nesta seção são divididos em duas partes.

A primeira parte apresenta os resultados da identificação de 16 diferentes casos de ovalização, porém considerando a condição de falha igual em ambos os mancais. Assim, há apenas duas variáveis de interesse no processo de busca, visto que os parâmetros de falhas  $k$  e  $\alpha$  são iguais nos mancais. Esses testes de identificação de falhas foram realizadas utilizando respostas de referência simuladas e contaminadas com ruído gaussiano branco, a fim de representar mais adequadamente as medidas experimentais obtidas em um rotor. Os valores da relação sinal-ruído (SNR) utilizados são de 12 dB e 18 dB, com base no trabalho disponível na literatura de Oliveira et al. (2021).

A Figura 2 mostra uma comparação entre as respostas de referência simuladas sem e com a adição de ruído gaussiano branco com 12 e 18dB.

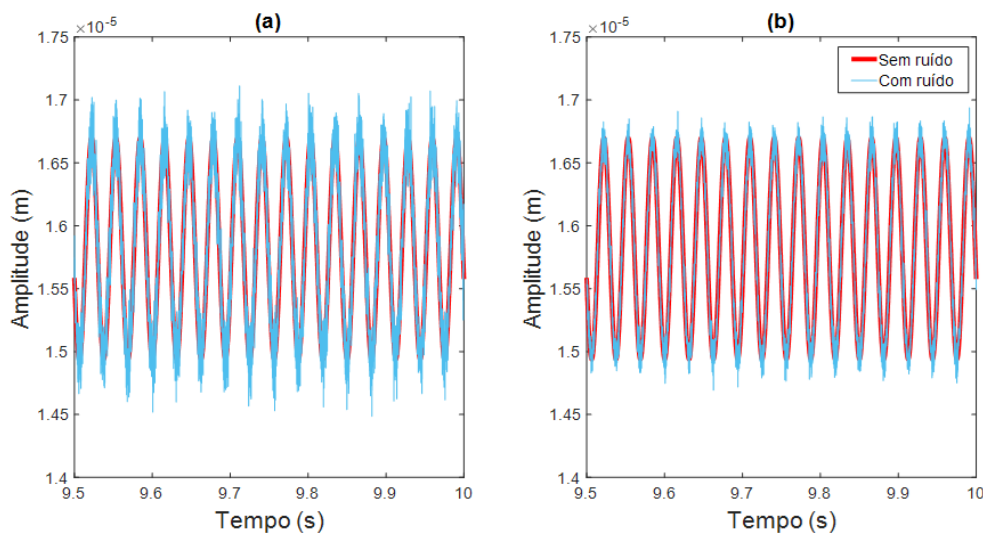


Figura 2: Deslocamento do eixo considerando ovalização de  $\kappa = 3\%$ .  $C_r$  e  $\alpha = 60^\circ$ : (a) SNR=12 dB, (b) SNR=18 dB

A segunda parte desta seção apresenta os resultados da identificação da falha de ovalização considerando condições de falha diferentes nos mancais. Desta forma, o processo de busca envolve agora quatro variáveis de interesse, a saber, os valores de  $k$  e  $\alpha$  dos mancais 1 e 2 ( $k_1, \alpha_1, k_2, \alpha_2$ ). Nestes testes de identificação de falha, as respostas de referência utilizadas são simuladas e contaminadas com ruído gaussiano branco de 18 dB.

#### 3.1 Método de Newton-Raphson aplicado à identificação da falha de ovalização considerando condições de falhas iguais em ambos os mancais

A partir das simulações realizadas neste trabalho, buscou-se então avaliar a acurácia do método através dos erros percentuais da identificação e a eficiência através do custo computacional. A Tabela 1 apresenta os resultados para a identificação da falha de ovalização através do método de Newton-Raphson.

De acordo com a Tabela 1, é possível verificar que todos os resultados foram identificados corretamente, sendo que a maioria dos casos apresentou erros percentuais abaixo de 10% e, portanto, resultando erros médios relativamente baixos (menores que 5,5%). Observa-se ainda que os casos com ruído de 12 dB apresentaram erros de identificação um pouco maiores, visto que este nível de ruído possui maior capacidade de contaminar a resposta de referência. Além disso, é possível observar ainda que alguns casos de ovalização com  $\alpha=90^\circ$  apresentaram valores negativos para o parâmetro identificado, uma vez que ambos os ângulos ( $90^\circ$  e  $-90^\circ$ ) geram o mesmo formato de ovalização. Desta forma, conclui-se que o método de Newton-Raphson se manteve robusto e promissor para a identificação de falhas de ovalização.

**Tabela 1: Resultados da busca pelo método de Newton-Raphson aplicado a identificação da falha de ovalização**

Caso	Razão Sinal-Ruído (SNR) de 18 dB				Razão Sinal-Ruído (SNR) de 12 dB		
	$[k(\%); \alpha(^{\circ})]$ adotados	$[k(\%); \alpha(^{\circ})]$ identificados	Erro (%)	Tempo (h)	$[k(\%); \alpha(^{\circ})]$ identificados	Erro (%)	Tempo (h)
1	[3,00; 0,00]	[2,97; -0,50]	[-1,00; -]	35,32	[3,29; -0,25]	[9,67; -]	9,25
2	[3,00; 30,00]	[3,05; 29,37]	[1,67; -2,10]	3,97	[3,06; 29,29]	[2,00; -2,37]	4,65
3	[3,00; 60,00]	[3,00; 53,90]	[0,00; -10,17]	5,20	[3,01; 53,34]	[0,33; -11,10]	4,51
4	[3,00; 90,00]	[3,03; -89,49]	[1,00; -0,57]	47,47	[3,26; -87,21]	[8,66; -3,10]	14,59
5	[6,00; 0,00]	[5,89; 0,04]	[-1,83; -]	4,48	[5,85; -0,26]	[-2,50; -]	23,93
6	[6,00; 30,00]	[5,86; 31,05]	[-2,33; 3,50]	3,68	[5,53; 35,46]	[-7,83; 18,20]	4,60
7	[6,00; 60,00]	[6,02; 59,90]	[0,33; -0,17]	5,81	[5,85; 64,98]	[-2,50; 8,30]	16,68
8	[6,00; 90,00]	[5,98; 90,28]	[-0,33; 0,31]	4,20	[6,03; 81,83]	[0,50; -9,08]	2,54
9	[9,00; 0,00]	[8,62; 1,19]	[-4,22; -]	3,37	[8,84; 0,51]	[-1,78; -]	4,53
10	[9,00; 30,00]	[8,86; 31,42]	[-1,56; 4,73]	3,71	[8,95; 30,26]	[-0,56; 0,87]	3,05
11	[9,00; 60,00]	[8,98; 59,82]	[-0,22; -0,30]	3,93	[9,11; 62,06]	[1,22; 3,43]	3,34
12	[9,00; 90,00]	[8,96; -89,94]	[-0,44; -0,07]	9,40	[8,92; 90,13]	[-0,89; 0,14]	5,60
13	[12,00; 0,00]	[11,99; -0,02]	[-0,08; -]	3,56	[11,82; 0,09]	[-1,50; -]	6,42
14	[12,00; 30,00]	[12,00; 30,00]	[0,00; 0,00]	3,73	[12,26; 28,33]	[2,17; -5,57]	3,05
15	[12,00; 60,00]	[11,98; 61,06]	[-0,17; 1,77]	4,72	[11,93; 60,39]	[-0,58; 0,65]	5,65
16	[12,00; 90,00]	[11,99; 89,87]	[-0,08; -0,14]	3,84	[12,01; 90,06]	[0,08; 0,07]	3,35
Média	-	-	[0,96; 1,99]	9,15	-	[2,67; 5,24]	7,23

### 3.2 Método de Newton-Raphson aplicado à identificação da falha de ovalização considerando diferentes condições de falhas nos mancais

Analogamente, busca-se agora avaliar a acurácia do método através dos erros percentuais da identificação e a eficiência através do custo computacional para os casos com condições de falhas diferentes nos mancais do sistema rotativo. A Tabela 2 apresenta os resultados para a identificação da falha de ovalização em diferentes condições de falha.

**Tabela 2: Resultados do método de busca de Newton-Raphson aplicado a identificação da falha de ovalização considerando ruído de 18 dB e diferentes condições de falhas nos mancais**

Caso	$[k_1(\%); \alpha_1(^{\circ})]$ adotados	$[k_1(\%); \alpha_1(^{\circ})]$ identificados	Erro (%)	$[k_2(\%); \alpha_2(^{\circ})]$ adotados	$[k_2(\%); \alpha_2(^{\circ})]$ identificados	Erro (%)	Tempo (h)
1	[0,00; 0,00]	[0,24; -]	[-; -]	[0,00; 0,00]	[0,02; -]	[-; -]	17,20
2	[0,00; 0,00]	[0,19; -]	[-; -]	[3,00; 0,00]	[3,13; -0,30]	[4,33; -]	6,34
3	[0,00; 0,00]	[0,00; -]	[-; -]	[3,00; 30,00]	[2,95; 29,98]	[-1,67; -0,07]	12,67
4	[0,00; 0,00]	[0,26; -]	[-; -]	[3,00; 60,00]	[3,06; 67,15]	[2,00; 11,92]	13,02
5	[0,00; 0,00]	[0,02; -]	[-; -]	[3,00; 90,00]	[2,78; 86,76]	[-7,33; -3,60]	13,58
6	[0,00; 0,00]	[0,05; -]	[-; -]	[6,00; 0,00]	[5,88; 0,09]	[-2,00; -]	72,60
7	[0,00; 0,00]	[0,01; -]	[-; -]	[6,00; 30,00]	[5,94; 30,41]	[-1,00; 1,37]	8,15
8	[0,00; 0,00]	[0,40; -]	[-; -]	[6,00; 60,00]	[6,09; 58,60]	[1,50; -2,33]	28,97
9	[0,00; 0,00]	[0,07; -]	[-; -]	[6,00; 90,00]	[6,10; 88,60]	[1,67; -1,56]	12,75
10	[3,00; 0,00]	[2,92; 2,15]	[-2,67; -]	[0,00; 0,00]	[0,00; -]	[-; -]	9,06
11	[3,00; 0,00]	[3,07; 0,15]	[2,33; -]	[3,00; 0,00]	[3,01; -0,72]	[0,33; -]	31,25
12	[3,00; 0,00]	[3,04; -0,02]	[1,33; -]	[3,00; 30,00]	[3,02; 28,09]	[0,67; -6,37]	9,96
13	[3,00; 0,00]	[2,95; -0,01]	[-1,67; -]	[3,00; 60,00]	[2,89; 62,67]	[-3,67; 4,45]	15,40
14	[3,00; 0,00]	[2,86; 0,37]	[-4,67; -]	[3,00; 90,00]	[2,60; 84,82]	[-13,33; -5,76]	17,20
15	[3,00; 0,00]	[3,09; -0,66]	[3,00; -]	[6,00; 0,00]	[6,32; -1,27]	[5,33; -]	13,48
16	[3,00; 0,00]	[2,88; 2,31]	[-4,00; -]	[6,00; 30,00]	[6,00; 29,86]	[0,00; -0,47]	4,53
17	[3,00; 0,00]	[2,85; 0,94]	[-5,00; -]	[6,00; 60,00]	[6,04; 58,45]	[0,67; -2,58]	11,77
Média	-	-	[3,08; -]	-	-	[3,03; 3,68]	17,53

Analisando a Tabela 2 nota-se que o método de Newton-Raphson foi capaz de identificar a falha de ovalização específica de cada mancal para todos os casos analisados. A maioria dos valores identificados para os parâmetros de falhas se aproximaram de suas respectivas soluções, embora alguns casos tenham apresentado algumas discrepâncias, tal como o ângulo de ovalização identificado do segundo mancal no caso 4 e a magnitude da deformação do segundo mancal no caso 14. Entretanto, vale a pena mencionar que tanto o caso 4 quanto o caso 14 se referem a falhas de 3% da folga radial do mancal, que representa um baixo nível de ovalização e, assim, pouca influência na resposta dinâmica do rotor, principalmente quando considerado a inclusão de ruído na resposta de referência da máquina. Em relação ao tempo de busca, é possível constatar que houve um aumento para esses casos com diferentes condições de falhas nos mancais quando comparado aos casos com condições de falhas iguais nos mancais, devido ao maior número de variáveis envolvidas no processo de busca. Destaca-se ainda que os valores identificados para o ângulo  $\alpha$  dos mancais sem ovalização ( $k=0$ ) não foram apresentados, visto que a magnitude de ovalização é nula e, assim, qualquer valor de  $\alpha$  atende como uma solução correta. Os casos 6, 8 e 11 apresentaram tempo de busca bastante elevado, haja vista que não convergiram nas estimativas iniciais da estratégia *multi-start*.

#### 4. CONCLUSÕES

Percebe-se que o método proposto foi capaz de identificar os parâmetros de falha com acurácia, principalmente nos casos onde as condições de falha são iguais nos dois mancais, haja vista que mesmo com a contaminação do sinal de referência com ruído de 12 dB os erros percentuais médios mantiveram-se em torno ou abaixo de 5%. Já nos casos onde as condições de falha são diferentes, há alguns poucos casos com erro percentual alto, embora ressalta-se o fato desses casos terem baixo nível de ovalização, logo pouca influência sobre a resposta de referência utilizada na identificação. Porém, mesmo nos casos onde as condições de falha são diferentes nos dois mancais, todos os erros percentuais médios estão abaixo de 5%.

Em ambas situações, condições de falha iguais ou diferentes nos mancais, há casos de identificação da ovalização com custo computacional maior que a maioria dos casos, uma vez que não convergiram nas estimativas iniciais, denotando assim que uma boa estimativa inicial é importante tanto para precisão da identificação quanto para o custo computacional, logo estando relacionada diretamente ao custo-benefício do método de identificação. Além disso, percebe-se que o tempo médio de busca para os casos onde as ovalizações dos mancais são diferentes é maior que o tempo médio dos casos onde as ovalizações nos mancais são iguais, haja vista que para esses casos com ovalizações diferentes há um número maior de variáveis de interesse.

Desta forma, nota-se que este trabalho desenvolveu um método capaz de identificar os parâmetros de falha para diferentes níveis de ovalização usando apenas a resposta vibracional do rotor, proporcionando avanços importantes para área de diagnose e identificação de falhas, além de contribuir para um melhor entendimento sobre a identificação de falhas de ovalização em mancais hidrodinâmicos.

Além disso, com os resultados promissores apresentados, conclui-se que o método proposto pode contribuir diretamente para ampliação e melhoria de sistemas de monitoramento de máquinas rotativas, auxiliando no planejamento adequado da manutenção e na redução de paradas inesperadas do sistema produtivo, evitando perdas econômicas, além de ajudar a prevenir acidentes.

---

#### BIBLIOGRAFIA

- LEE, C.W. "Vibration Analysis of Rotors". 1.ed. Dordrecht / Boston / London: Kluwer Academic Publishers, 1993, pp. 44-45.
- 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.
- MENDES, R.U., "Validação Experimental de Modelo para Identificação de Parâmetros de Falha por Desgaste em Mancais Lubrificados", Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2016. Dissertação (Doutorado).
- MENEZES, M., "Cálculo Numérico". Laureate- International Universities, 2015, pp.22-26.
- OLIVEIRA, M.V.M., CUNHA, B.Z., DANIEL, B.G., "A model-based technique to identify lubrication condition of hydrodynamic bearings using the rotor vibrational response". Tribol. Int. 160 (2021), doi: 10.1016/j.triboint.2021.107038.
- 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.
- SASSI, C.A., "Sobre o desempenho de métodos Quase-Newton e aplicações", Campinas: Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Universidade Estadual de Campinas, 89 p. 2010. Dissertação (Mestrado).
- 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.
- NELSON, H. D., "A finite rotating shaft element using Timoshenko beam theory", ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 102, n. 4, pp. 793-803, 1980.