



08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

ANÁLISE DE INCERTEZA EM UM SISTEMA DE LEVITAÇÃO ACÚSTICA DE CAMPO PRÓXIMO

Geisa Arruda Zuffi¹ - geisazuffi@ufu.br

Fran Sérgio Lobato² - fslobato@ufu.br

Fabian Andres Lara-Molina³ - fabianmolina@utfpr.edu.br

Aldemir Ap. Cavalini Jr.¹ - aacjunior@ufu.br

Valder Steffen Jr.¹ - vsteffen@ufu.br

¹LMEst – Laboratório de Mecânica de Estruturas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

²NUCOP – Laboratório de Modelagem, Simulação, Controle e Otimização de Processos Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

³Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, PR, Brasil.

Abstract. *Este trabalho tem como objetivo analisar o efeito de parâmetros incertos em um sistema mecânico que representa o fenômeno da levitação acústica de campo próximo, cujo comportamento dinâmico é descrito pela equação de Reynolds. As incertezas consideradas são devidas às variações nas condições ambientais e no sistema de atuação, sendo estas representadas por variáveis aleatórias. As forças de sustentação associadas ao problema avaliado são obtidas a partir da solução do modelo e do método de simulação de Monte Carlo. Os resultados numéricos obtidos permitiram avaliar a resposta incerta do sistema e determinar a sensibilidade de cada parâmetro incerto na variação das forças de sustentação encontradas.*

Keywords: *Levitação acústica de campo próximo, equação de Reynolds, filme de fluido comprimido, incertezas, sensibilidade.*

1. INTRODUÇÃO

A levitação acústica de campo próximo consiste em promover a suspensão de objetos a partir do acionamento de uma superfície em uma frequência ultrassônica (acima de 20 kHz), de forma que o ar que se encontra entre esta superfície e o objeto a ser levitado seja pressurizado. Para isso, é necessário que a distância entre a superfície acionadora e o objeto a ser levitado seja inferior a metade do comprimento de onda utilizado para excitar a superfície acionadora (Issar & Bucher, 2015).

Como aplicações desta abordagem pode-se citar a construção de sistemas de transporte (Thomas et al., 2017), de *flywheel* (Peng et al., 2009), o seu uso em mancais (Stolarski et al., 2011), e em motores de alta rotação (motores ultrassônicos) (Yamazaki et al., 1996). Nestes exemplos, observa-se que a capacidade de carga tem se mostrado limitada, sendo a maior relatada

na literatura de 21 N (Zhao, 2010). Cabe ressaltar que nas aplicações mencionadas, nenhuma análise foi realizada com o intuito de identificar quais parâmetros influenciam o desempenho de forma a possibilitar a maximização das potencialidades desta técnica.

Nesse contexto, faz-se necessária a análise de incertezas de um sistema mecânico que representa o fenômeno de levitação acústica de campo próximo. Com esta análise é possível determinar a influência de parâmetros ambientais e de operação acerca do comportamento dinâmico do sistema de levitação, permitindo identificar quais intervêm na força gerada pelo campo de pressão que sustenta o objeto levitado. Para essa finalidade será empregado o método de simulação de Monte Carlo como ferramenta de análise de incertezas paramétricas. Uma análise de sensibilidade também é realizada para determinar a contribuição de cada parâmetro incerto na variação da força efetiva de levitação.

Este trabalho está estruturado como segue. A seção 2. apresenta a descrição matemática do fenômeno de levitação acústica de campo próximo. A seção 3. apresenta a análise de incerteza, bem como a análise de sensibilidade. Já na seção 4. são apresentados os resultados obtidos com estas análises. As conclusões acerca deste trabalho são apresentadas na última seção.

2. MODELO NUMÉRICO LEVITAÇÃO ACÚSTICA DE CAMPO PRÓXIMO

Para descrever o modelo matemático que representa o fenômeno de levitação acústica de campo próximo, supõe-se um sistema mecânico formado por dois discos imersos em ar a pressão atmosférica, sendo a distância inicial entre eles dada por h_0 . O disco superior é considerado fixo, enquanto o inferior é induzido a vibrar senoidalmente a uma frequência ω e com uma amplitude δh , recebendo assim o nome de superfície acionadora, como mostra a Fig. 1.

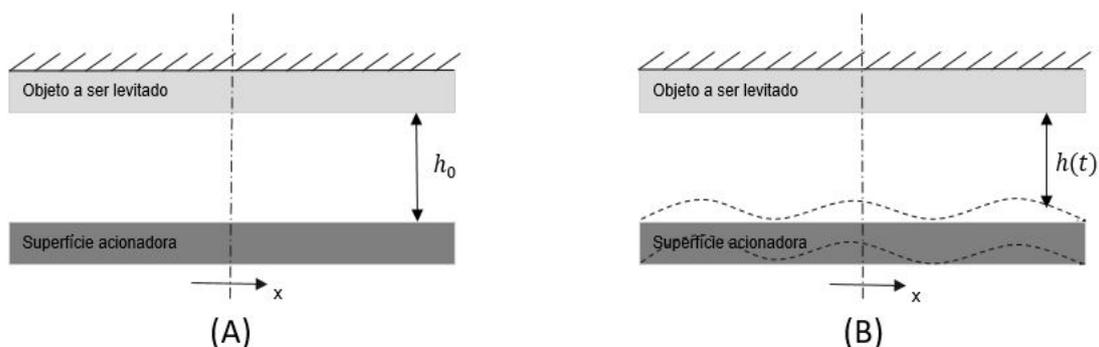


Figure 1- Sistema utilizado na análise: (a) em repouso (b) superfície acionada em alta frequência.

Sendo assim, tem-se que a variação no tempo da distância entre as superfícies pode ser dada pela Eq. (1):

$$h(t) = h_0 + \delta h \sin(\omega t) \quad (1)$$

O comportamento do filme de ar é obtido a partir da equação de Reynolds em coordenadas cartesianas, considerando que a distância entre as superfícies é pequena quando comparada com as outras dimensões e que não ocorrem variações na temperatura do filme (Zhao, 2010). Dessa forma obtêm-se a Eq. (2):

$$\frac{\partial}{\partial x}(ph^3 \frac{\partial p}{\partial x}) = 12\mu \frac{\partial(ph)}{\partial t} \quad (2)$$

onde p representa a distribuição do campo de pressão no tempo t e ao longo do comprimento x dos discos, h representa a variação no tempo da distância entre o objeto a ser levitado e a superfície acionadora $h(t)$ e μ a viscosidade dinâmica do ar.

As Eqs. (1) e (2) podem ser integradas numericamente considerando que o sistema é simétrico e que a pressão nas bordas dos discos é igual a pressão atmosférica. Assim, conhecendo-se a pressão no filme, calcula-se a força exercida sobre o objeto a ser levitado a partir da Eq. (3):

$$F_l = 2\pi \int_0^{0,5} x(p - p_0) dx \quad (3)$$

sendo p_0 a pressão inicial entre as superfícies (pressão atmosférica).

3. ANÁLISE DE INCERTEZAS E SENSIBILIDADE

Esta seção apresenta a metodologia utilizada para analisar o efeito das incertezas e a quantificação das sensibilidades destas na resposta dinâmica do sistema de levitação.

3.1 Análise de Incerteza

Os parâmetros ambientais, dinâmicos e geométricos dos modelos que descrevem um dado fenômeno tipicamente são afetados por incertezas. As condições de operação do sistema de levitação podem sofrer variações devido à mudanças nas condições ambientais de pressão atmosférica e temperatura. Estas variações ambientais incidem diretamente nos parâmetros p_0 e μ do modelo apresentado nas Eqs. (2) e (3), respectivamente. Por outro lado, o atuador também pode introduzir incertezas no sistema em função de distúrbios externos e fenômenos dinâmicos não representados pelo modelo adotado. Neste cenário, consideram-se incertezas nos parâmetros δh e h_0 . Portanto, os parâmetros nos quais adicionam-se as incertezas no sistema de levitação acústica de campo próximo apresentado previamente na seção 2. são os parâmetros ambientais p_0 e μ e os parâmetros relacionados ao atuador δh e h_0 .

Para a modelagem dos parâmetros incertos, considera-se que estes podem ser descritos como variáveis aleatórias mediante a utilização da Eq. (4).

$$a_0(\theta) = a_0 + a_0 \delta_a \xi(\theta) \quad (4)$$

onde a_0 representa a média, δ_a é o nível de dispersão e $\xi(\theta)$ é uma variável aleatória normal com θ sendo um processo aleatório. A variável aleatória normal é governada por uma função de distribuição de probabilidade normal que foi selecionada para avaliar os parâmetros incertos no presente trabalho.

É importante ressaltar que o método de Simulação de Monte Carlo, juntamente com o método de amostragem por Hipercubo Latino (Florian, 1992), foi utilizado para simular a resposta dinâmica do sistema de levitação com relação aos parâmetros incertos.

3.2 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade tem como objetivo determinar a influência de cada parâmetro incerto na resposta dinâmica do sistema de levitação, ou seja, avaliar a influência dos parâmetros incertos sob a variação da força de levitação será analisada. Portanto, a análise de sensibilidade permite indicar o grau de influência de cada parâmetro incerto na variação da força de levitação.

Dentre os vários métodos utilizados para a análise de sensibilidade, a que é baseada em decompor a variância da saída do modelo numérico em varias frações correspondentes foi a considerada como ferramenta numérica neste trabalho (Saltelli et al., 2008). Este método permite quantificar o efeito da variação de cada parâmetro na resposta incerta do sistema de levitação mediante a análise das respostas obtidas pela simulação de Monte Carlo. Cabe ressaltar que este método tem se mostrado eficiente quando aplicado a modelos não lineares, sendo, portanto, adequado utilizá-lo para quantificar a sensibilidade do sistema de levitação (Iooss et al., 2015).

Considere o modelo numérico do sistema de levitação na forma $y = f(\mathbf{w})$, onde y é uma saída escalar e $\mathbf{w} = [w_1 \dots w_k]^T \in \mathbb{R}^{k \times 1}$ é um vetor de k parâmetros. Estes são considerados independentes entre si e seguem um comportamento que permite a sua representação por uma função de distribuição normal. Assim, podem ser decompostos como segue:

$$y = f(\mathbf{w}) = f_0 + \sum_{i=1}^k f_i(w_i) + \sum_{i<j}^k f_{ij}(w_i, w_j) + \dots + f_{12\dots k} \quad (5)$$

A expressão correspondente à decomposição da variância é dada por (Sobol', 1990):

$$V(y) = \sum_{i=1}^k V_i + \sum_{i<j}^k V_{ij} + \dots + V_{12\dots k} \quad (6)$$

onde $V_i = V_{w_i}(E_{\mathbf{w}_{\sim i}}(y|w_i))$, $V_{ij} = V_{w_{ij}}(E_{\mathbf{w}_{\sim ij}}(y|w_{ij}))$ e, assim, sucessivamente. O efeito de variância de primeira ordem para um parâmetro w_i é definido por $V_{w_i}(E_{\mathbf{w}_{\sim i}}(y|w_i))$, onde w_i é o i – *esimo* parâmetro e $\mathbf{w}_{\sim i}$ denota a matriz de todos os parâmetros a exceção de w_i .

A medida de sensibilidade associada às expressões mostradas anteriormente denomina-se índice de sensibilidade de primeira ordem, que é definida mediante a seguinte expressão:

$$s_i = \frac{V_{w_i}(E_{\mathbf{w}_{\sim i}}(y|w_i))}{V(y)} \quad (7)$$

s_i denota o efeito na saída do parâmetro w_i . Adicionalmente, o índice de efeito total s_{Ti} mede a contribuição do parâmetro w_i na variância da saída que inclui todos os efeitos da interação com qualquer outro parâmetro.

$$s_{Ti} = \frac{E_{\mathbf{w}_{\sim i}}(V_{w_i}(y|w_{\sim i}))}{V(y)} = 1 - \frac{V_{\mathbf{w}_{\sim i}}(E_{w_i}(y|w_{\sim i}))}{V(y)} \quad (8)$$

A simulação de Monte Carlo combinada com a amostragem por Hipercubo Latino (Florian, 1992) é usada para calcular os índices de efeito total. O número total de vezes que o modelo deve ser avaliado para calcular os índices de sensibilidade total é definido por $N = n_s(k + 1)$, onde n_s é o número de amostras da simulação de Monte Carlo (Saltelli et al., 2008).

4. Resultados Numéricos

Nesta seção são apresentados os resultados correspondentes à simulação numérica das respostas dinâmicas do sistema de levitação sob o efeito dos parâmetros considerados incertos. Como descrito por Zhao (2010), os parâmetros típicos correspondentes a um sistema de levitação são definidos como: $L = 30$ mm (comprimento do disco), $\delta h = 5 \mu\text{m}$, $f = 20$ kHz, $h_0 = 50 \mu\text{m}$, $p_0 = 101325$ Pa e $\mu = 1,8253 \times 10^{-5}$ kg/(m s).

Tal qual referido anteriormente, as incertezas são introduzidas nos parâmetros δh , h_0 , p_0 e μ de acordo com expressão definida pela Eq. (4), sendo que a média representa o valor nominal de cada parâmetro e a dispersão δ_a é de 5%.

4.1 Análise de Incertezas

Inicialmente, examina-se o comportamento do campo de pressão considerando os parâmetros incertos. Para isto, diferentes campos de pressão $p(x,t)$ foram obtidos a partir dos parâmetros incertos determinados através da simulação de Monte Carlo.

A Fig. 2 apresenta o envelope de trabalho correspondente aos valores máximos e mínimos obtidos para $p(x,t)$. Observa-se que os parâmetros incertos produzem uma variação significativa na amplitude do campo de pressão. Portanto, os parâmetros incertos (condições ambientais e parâmetros do atuador) incidem de maneira importante no comportamento dinâmico do sistema de levitação.

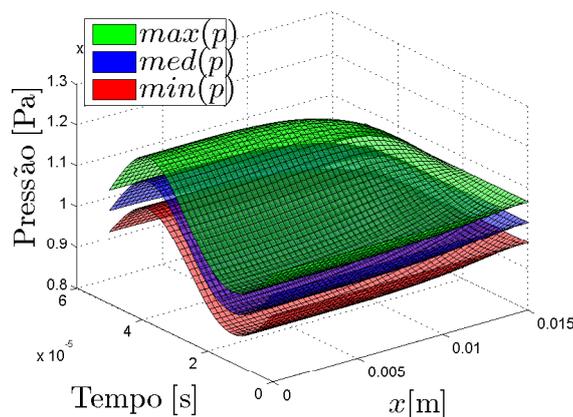


Figure 2- Campo de pressão sob o efeito de incertezas.

O comportamento da força de levitação (F_l) em função do tempo é apresentado na Fig. 3. Como esperado, os resultados mostram que os parâmetros incertos produzem uma variação na amplitude da força de levitação proporcional a variação observada no campo de pressão (veja a Fig. 2). Uma variação maior é observada quando a força de levitação tem amplitude positiva.

4.2 Análise de Sensibilidade

Conforme descrito anteriormente, a análise de sensibilidade consiste em determinar a contribuição de cada parâmetro incerto na variação da força efetiva de levitação. A força efetiva de levitação é definida pela Eq. (9):

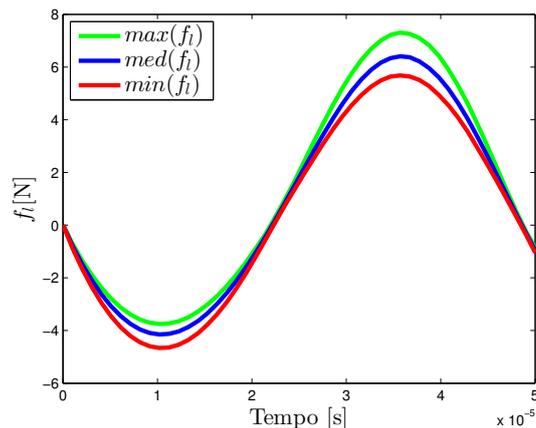


Figure 3- Variação da força de levitação.

$$f_{le} = \frac{1}{T_l} \int_0^{T_l} f_l(t) dt \quad (9)$$

onde $T_l = 2\pi/\omega$.

Aplicando a metodologia apresentada na seção 3.2 com $k = 4$ e $n_s = 100$ (número de amostras suficiente para realizar a análise estatística que foi determinada por uma análise de convergência) obtém-se os índices de sensibilidade apresentados na Fig. 4. Observa-se que os parâmetros referentes às condições ambientais p_0 e μ apresentam uma sensibilidade menor do que os parâmetros incertos relacionados à atuação do sistema δh e h_0 . Além disso, verifica-se que a força de levitação não é influenciada pela viscosidade do ar, enquanto mostra-se sensível a variação da pressão atmosférica. A pressão atmosférica é responsável pela modulação do campo de pressão. O parâmetro mais sensível é a amplitude de excitação δh . Adicionalmente, observa-se que a distância entre os discos apresenta uma sensibilidade considerável na força de levitação.

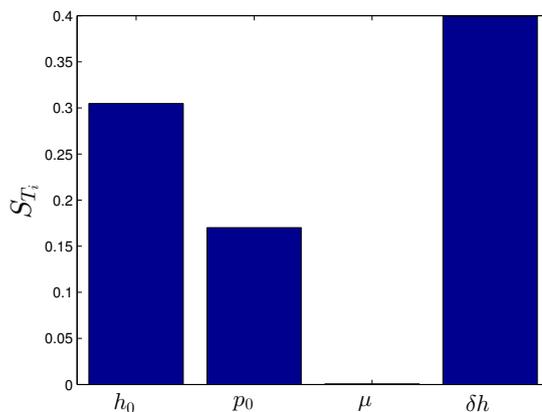


Figure 4- Índices de sensibilidade.

5. Conclusões

Este trabalho teve por objetivo avaliar o efeito de incertezas afetando as condições ambientais (p_0 e μ) e de operação (δh e h_0) de um sistema de levitação acústica de campo próximo por meio da avaliação da força de levitação gerada. Uma análise de sensibilidade sobre os mesmos parâmetros foi realizada.

Para isso, utilizou-se o método de Simulação de Monte Carlo em conjunto com o método de amostragem por Hipercubo Latino. A força de levitação foi obtida a partir da integração do campo de pressão gerado entre a superfície acionadora e o objeto a ser levantado, resultante da solução da Equação de Reynolds.

Dessa forma, foi possível constatar que os parâmetros avaliados exercem influência apenas sobre a amplitude da força de levitação. A amplitude de vibração da superfície acionadora e a distância inicial entre a superfície acionadora e a superfície inferior do objeto levantado foram os parâmetros que mais afetam a força de levitação. A pressão inicial entre as superfícies também influencia o desempenho do sistema de levitação. Entretanto, a força de levitação obtida se mostrou pouco sensível a viscosidade do ar.

Agradecimentos

Os autores agradecem as agências de fomento CAPES, FAPEMIG (TEC-APQ-3076-09, TEC-APQ-02284-15 e TEC-APQ-00464-16) e CNPq (INCT-EIE - 574001/2008-5 e 304546/2018-8) pelo apoio financeiro.

REFERENCES

- Ilssar, D., & Bucher, I. (2015). On the slow dynamics of near-field acoustically levitated objects under High excitation frequencies. *Journal of Sound and Vibration*, 354, 154-166.
- Thomas, G. P., Andrade, M. A., Adamowski, J. C., & Silva, E. C. N. (2017). Development of an acoustic levitation linear transportation system based on a ring-type structure. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 64(5), 839-846.
- Peng, T., Yang, Z., Kan, J., Tian, F., & Che, X. (2009). Performance investigation on ultrasonic levitation axial bearing for flywheel storage system. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 4(4), 415.
- Stolarski, T. A., Xue, Y., & Yoshimoto, S. (2011). Air journal bearing utilizing near-field acoustic levitation stationary shaft case. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 225(3), 120-127.
- Yamazaki, T., Hu, J., Nakamura, K., & Ueha, S. (1996). Trial construction of a noncontact ultrasonic motor with an ultrasonically levitated rotor. *Japanese journal of applied physics*, 35(5S), 3286.
- Zhao, S. (2010). *Investigation of Non-contact Bearing Systems Based on Ultrasonic Levitation*, Tese de Doutorado, PZH, Produktionstechn, Zentrum.
- Florian, A. (1992). An efficient sampling scheme: updated latin hypercube sampling. *Probabilistic engineering mechanics*, 7(2), 123–130.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. John Wiley & Sons Chichester, England.
- Iooss, B., and Paul L. (2015). *A review on global sensitivity analysis methods. Uncertainty management in simulation-optimization of complex systems*, 101-122. . Springer, Boston, MA, 2015. .
- Sobol', I.M. (1990). On sensitivity estimation for nonlinear mathematical models. *Matematicheskoe Modelirovanie*, 2(1), 112–118.

UNCERTAINTY ANALYSIS OF AN ACOUSTIC LEVITATION SYSTEM

Abstract. *This work aims to analyze the effect of uncertain parameters in a mechanical system that represents the phenomenon of the near field acoustic levitation whose dynamic behavior is described by the Reynolds equation. The uncertainties considered are due to variations in*

environmental conditions and in the driving system, which are represented by random variables. The support forces associated to the evaluated problem are obtained from the model solution and the Monte Carlo simulation method. The numerical results obtained, allows evaluate the uncertain response of the system and determine the sensitivity of each uncertain parameter in the variation of the support forces found.

Keywords: *Near-field acoustic levitation, Reynolds Equation, squeeze film, uncertainties, sensitivity*