

Simulação de um Sistema de Levitação Acústica para Manipulação de Partículas em Ar

Marco A. B. Andade^{*1}, Nicolás Pérez², Julio C. Adamowski³

1. Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

2. Centro Universitario de Paysandú, Universidad de la República, Paysandú, Uruguai

3. Depto. de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

* Autor correspondente: Rua do Matão, 1371, CEP 05508-090, Cidade Universitária, São Paulo/SP, marcobrizzotti@gmail.com

Resumo: Este artigo apresenta a simulação numérica de um sistema de levitação acústica capaz de levitar e manipular pequenas partículas em ar. O sistema de levitação é formado por dois transdutores de ultrassom de 37,9 kHz e um refletor plano. Com o objetivo de entender o comportamento do sistema, são realizadas simulações numéricas utilizando o módulo acústico do software COMSOL Multiphysics, onde são obtidos os campos de pressão e velocidade na região com ar. Os campos de pressão e velocidade obtidos numericamente são utilizados na equação de Gor'kov para determinar o potencial da força de radiação acústica que atua numa esfera pequena. As posições de mínimo potencial são comparadas com a posição de levitação de uma esfera para diferentes valores de fase entre os transdutores, mostrando que há boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

Palavras-chave: levitação acústica, ultrassom, força de radiação acústica.

1. Introdução

Um típico dispositivo de levitação acústica consiste de um emissor de ondas acústicas e de uma superfície refletora^{1,2}. Neste tipo de dispositivo, é produzida uma onda acústica estacionária de alta intensidade entre o emissor e a superfície refletora, e devido ao fenômeno da força de radiação acústica³, pequenas partículas podem ser suspensas nos nós de pressão da onda estacionária.

Recentemente, foram propostos novos dispositivos que são capazes de levitar e manipular partículas em ar^{4,5}. Uma das formas de realizar a manipulação de partículas é produzir uma onda estacionária a partir da superposição de duas ondas progressivas emitidas por dois emissores opostos. Ao alterar a diferença de fase entre os emissores, o nó de pressão da onda é

deslocado, fazendo com que a partícula aprisionada no nó seja manipulada⁶.

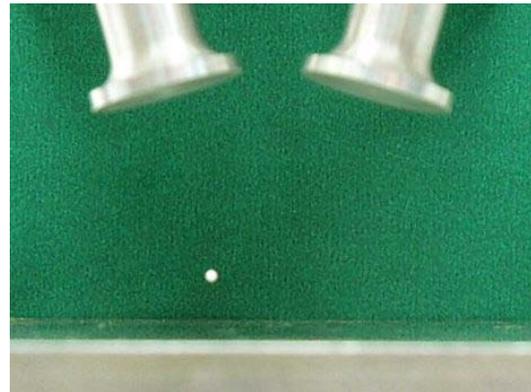


Figura 1. Sistema de manipulação acústica formado por dois transdutores de ultrassom e uma superfície plana. Os transdutores operam numa frequência de 37,9 kHz e possuem um diâmetro de 20 mm. Os transdutores estão inclinados de um ângulo de 17° em relação ao plano horizontal e a distância entre os centros das faces dos transdutores corresponde a 26 mm.

Neste trabalho é apresentada a simulação computacional de um sistema de manipulação acústica de partículas, que é formado por dois transdutores de ultrassom de 37,9 kHz e de uma superfície plana⁷, conforme ilustrado na Figura 1. Ao alterar a diferença de fase entre os transdutores, a partícula levitada é manipulada horizontalmente.

2. Teoria

Uma partícula imersa em um meio fluido na presença de uma onda acústica sofre a ação de uma força denominada força de radiação acústica^{3,8}. Para o caso de uma partícula esférica de raio R , a força de radiação acústica produzida por uma onda acústica estacionária pode ser determinada através do potencial de Gor'kov U , que é calculado através de³:

$$U = 2\pi R^3 \left[\frac{\langle p^2 \rangle}{3\rho c^2} - \frac{\rho \langle \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} \rangle}{2} \right], \quad (1)$$

onde p é a pressão acústica, \mathbf{u} é o vetor velocidade das partículas do meio, ρ é a densidade do fluido no qual a esfera está imersa e c é a velocidade de propagação da onda no fluido. O símbolo $\langle \rangle$ denota a média temporal ao longo de um período de oscilação. A Eq. (1) assume que a partícula é rígida e que seu tamanho é muito menor que o comprimento de onda. Conhecendo-se o potencial U , a força de radiação acústica que atua na esfera é determinada através de:

$$\mathbf{F} = -\nabla U. \quad (2)$$

O potencial de Gor'kov é bastante útil para prever as posições de levitação de pequenas partículas em um campo acústico estacionário. Se a força gravitacional for desconsiderada, as posições de levitação correspondem às posições de mínimo potencial U .

O potencial de Gor'kov depende do raio da partícula. Com o intuito de obter um potencial que é independente do raio da partícula levitada, é utilizado o potencial adimensional, dado por¹:

$$\tilde{U} = \frac{U}{2\pi R^3 \rho u_0^2}, \quad (3)$$

onde u_0 é a amplitude de velocidade da face do transdutor.

3. Uso do COMSOL Multiphysics

Para determinar o potencial da força de radiação acústica, é necessário conhecer o campo de pressão p e o campo de velocidade \mathbf{u} . Esses dois campos são obtidos numericamente através do módulo acústico do software COMSOL Multiphysics.

Os campos p e \mathbf{u} são obtidos a partir de simulações no domínio da frequência e o acoplamento entre as partes sólidas (transdutores e superfície refletora) e o fluido acústico (ar) é realizado através de elementos com capacidade de interação fluido-estrutura. A geometria considerada na simulação é apresentada na Figura 2. Devido à simetria do sistema de levitação acústica, apenas a metade da geometria foi considerada no modelo. Para simular um meio infinito são utilizados elementos

absorvedores (PML – *Perfect Matching Layer*) nas extremidades da região com ar ($\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ e $c = 340 \text{ m/s}$).

Para simular os transdutores de ultrassom, são aplicadas condições de contorno de deslocamento nas faces dos transdutores, onde é considerado que ambas as faces vibram com amplitude de deslocamento de $1 \mu\text{m}$ em uma frequência de $37,9 \text{ kHz}$. Também foram realizadas simulações para verificar como a posição de levitação é alterada pela diferença de fase entre os transdutores. Para isso, são realizadas duas simulações. Na primeira simulação, o transdutor 2 é mantido desligado e o transdutor 1 é excitado com uma amplitude de deslocamento de $1 \mu\text{m}$. A partir dessa primeira simulação são obtidos os campo de pressão p_1 e o campo de velocidade \mathbf{u}_1 na região contendo ar. Na segunda simulação, o transdutor 1 é mantido desligado e o transdutor 2 é excitado com uma amplitude de deslocamento de $1 \mu\text{m}$, resultando nos campos p_2 e \mathbf{u}_2 . Devido a linearidade do modelo numérico, os campos na região com ar correspondem à superposição dos campos originados pelos transdutores 1 e 2. Dessa forma, os campos de pressão p_1 e p_2 , e os campos de velocidade \mathbf{u}_1 e \mathbf{u}_2 são exportados para o software Matlab e os campos resultantes são calculados através de:

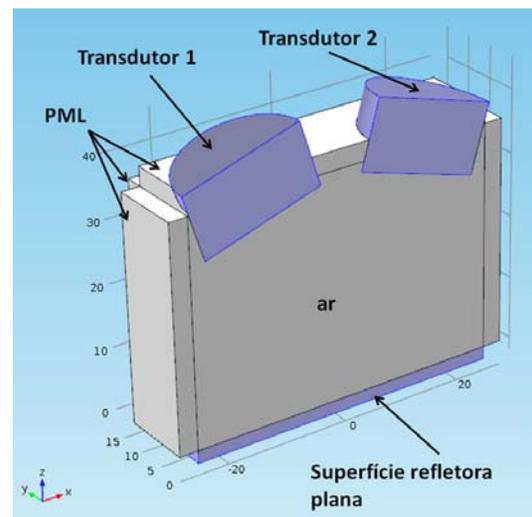


Figura 2. Geometria do sistema de manipulação por ultrassom utilizada na simulação. Devido à simetria, apenas a metade da geometria foi considerada na simulação.

$$p = p_1 + p_2 \exp(-j\theta), \quad (4)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2 \exp(-j\theta), \quad (5)$$

onde θ é a diferença de fase entre as ondas emitidas pelos transdutores 1 e 2 e j é o número imaginário. É importante salientar que os campos p e \mathbf{u} dados pelas Eqs. (4) e (5) são complexos e, portanto, o módulo corresponde à amplitude e o argumento do número complexo corresponde à fase.

Depois de utilizar as Eqs. (4) e (5) para determinar os campos p e \mathbf{u} , é utilizada a Eq. (1) para determinar o potencial da força de radiação acústica U que atua numa esfera de raio R . Finalmente, o potencial U é substituído na Eq. (3) para obter o potencial de Gor'kov adimensional. A Eq. (3) também requer a amplitude de velocidade u_0 da face do transdutor. Para determinar a amplitude de velocidade, basta multiplicar a amplitude de deslocamento pela frequência angular ω . Dessa forma, considerando que a amplitude de deslocamento da face dos transdutores é $1 \mu\text{m}$ e que a frequência é igual a $37,9 \text{ kHz}$, a amplitude de velocidade u_0 corresponde a $0,238 \text{ m/s}$.

4. Descrição Experimental

O sistema de levitação acústica é formado por dois transdutores de ultrassom e um refletor plano, conforme ilustrado na Figura 3. Os transdutores operam numa frequência de $37,9 \text{ kHz}$ e possuem uma face circular de 20 mm de diâmetro. Os transdutores estão inclinados por um ângulo de 17° em relação ao plano horizontal e a distância entre o centro das faces dos transdutores é de 26 mm . Para excitar eletricamente os transdutores, são utilizados dois geradores de funções, são utilizados dois amplificadores de alta potência (800A3A , Amplifier Research Corp.). Os geradores de função são sincronizados e a diferença de fase entre eles é controlada remotamente através de um código desenvolvido em Matlab. Ao alterar a diferença de fase entre os transdutores, a partícula levitada é deslocada horizontalmente. Uma foto do sistema em operação é apresentada na Fig. 1, que mostra a levitação acústica de uma pequena esfera de isopor.

5. Resultados

A Figura 4 apresenta a distribuição de pressão acústica obtida para o caso onde as faces dos dois transdutores vibram harmonicamente com uma diferença de fase de -180° e com uma amplitude de deslocamento de $1 \mu\text{m}$. Na Figura 5 é apresentado o gráfico do potencial da força de radiação acústica. O ponto circular branco na Figura 5 indica a posição de um dos mínimos de potencial. Comparando-se as Figuras 1 e 4 pode-se notar que há boa concordância entre a posição de mínimo potencial (ponto circular branco) e a posição de levitação da esfera.

Com o modelo numérico também foi possível simular o potencial de Gor'kov para diferentes valores de θ . A Figura 6 apresenta a comparação entre o potencial de Gor'kov obtido numericamente com a posição de levitação de uma esfera de isopor para três valores de fase (-180° , 30° e $+180^\circ$). Como pode ser observado na Figura 6, há boa concordância entre a posição de um dos mínimos de potencial com a posição de levitação da esfera. Apesar de os potenciais de Gor'kov serem iguais para $\theta = -180^\circ$ e $\theta = +180^\circ$, a partícula pode ser transportada quando o valor de θ é alterado gradativamente de -180° até $+180^\circ$. Por exemplo, a Figura 6(a) mostra que a esfera de isopor se encontra na posição $x = -6,5 \text{ mm}$ quando $\theta = -180^\circ$ e ao alterar a fase gradativamente até $+180^\circ$, a partícula é transportada de $x = -6,5 \text{ mm}$ para a posição $x = +6,5 \text{ mm}$ (Figura 6(e)).

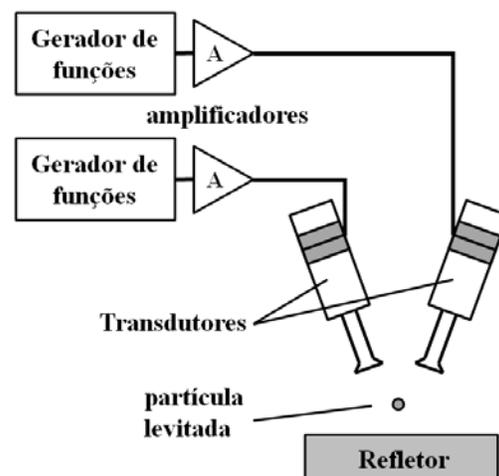


Figura 3. Aparato experimental utilizado para levantar e manipular partículas por meio de ondas acústicas.

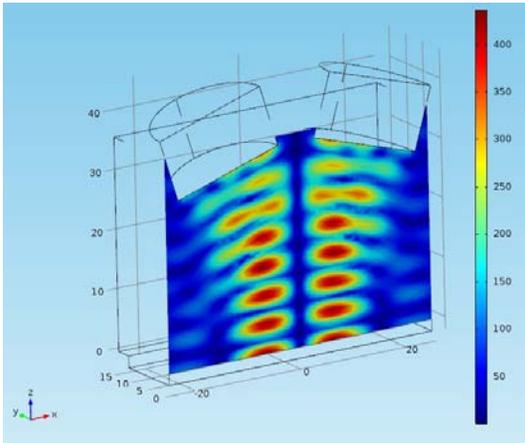


Figura 4. Módulo da pressão p para os dois transdutores vibrando com diferença de fase de -180° e com uma amplitude de deslocamento de $1\ \mu\text{m}$ em uma frequência de $37,9\ \text{kHz}$.

Para demonstrar a capacidade de manipulação sem contato do sistema de levitação, foi desenvolvido um código em Matlab capaz de controlar remotamente os geradores de função, possibilitando que a fase entre os dois transdutores seja alterada dinamicamente. Em um dos experimentos realizados, a fase foi aumentada gradativamente de -180° à 180° num intervalo de tempo de $2,2\ \text{s}$.

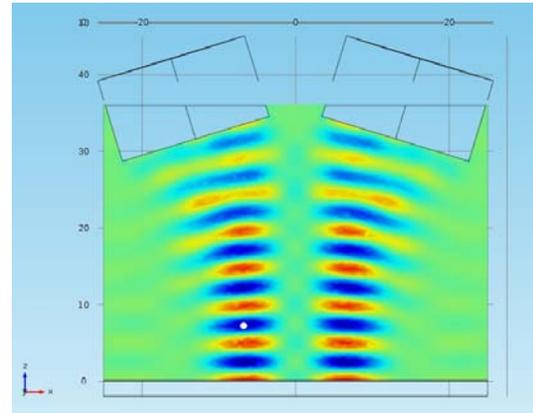


Figura 5. Potencial da força de radiação acústica quando a diferença de fase entre os transdutores corresponde a -180° . Os poços de potencial estão representados na cor azul. Devido à força de radiação acústica, pequenas partículas podem ser levitadas nas posições de mínimo potencial.

Ao atingir uma diferença de fase de 180° , a fase era mantida fixa em 180° por $0,8\ \text{s}$. Em seguida, o valor de fase era reduzido gradativamente por $2,2\ \text{s}$ até atingir -180° , e novamente, a fase era mantida fixa em -180° por $0,8\ \text{s}$. Este ciclo foi repetido diversas vezes, permitindo que a partícula levitada fosse transportada diversas vezes de $x = -6,5\ \text{mm}$ para $x = +6,5\ \text{mm}$ e de $x = 6,5\ \text{mm}$ à $x = -6,5\ \text{mm}$.

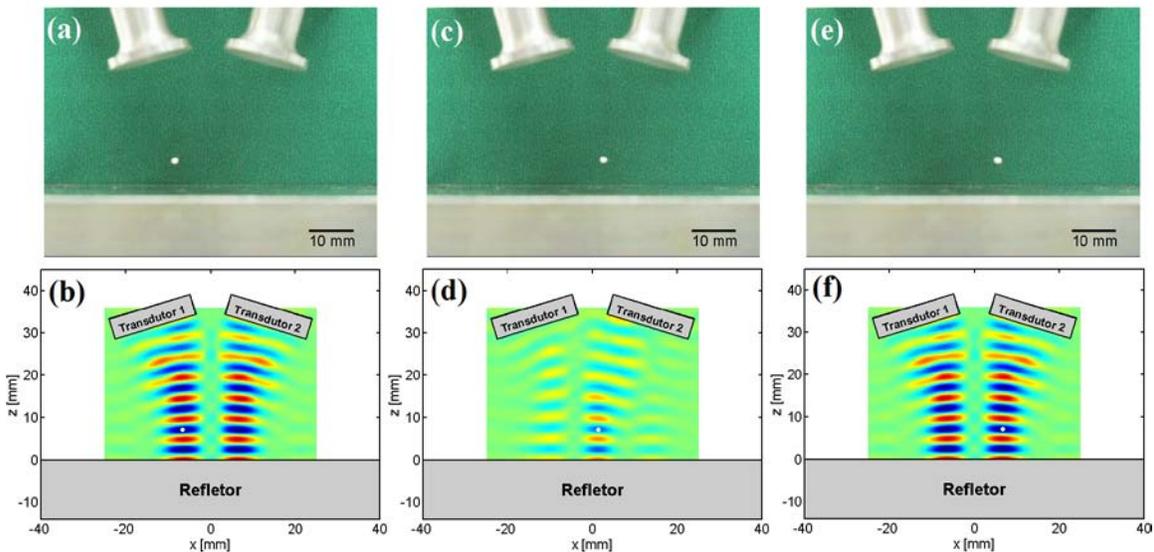


Figura 6. Comparação entre a posição de levitação de uma esfera de isopor obtida experimentalmente e o potencial de Gor'kov obtido numericamente para três valores de diferença de fase entre os transdutores: (a) e (b): $\theta = -180^\circ$; (c) e (d): $\theta = +30^\circ$; (e) e (f): $\theta = +180^\circ$.

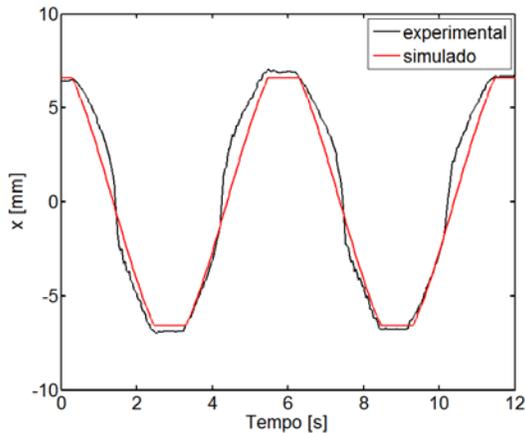


Figura 7. Comparação entre a posição horizontal da esfera obtida experimentalmente e a posição de um dos mínimos de potencial obtidos através da simulação. O ciclo completo de movimentação, para a partícula ser transportada de $x = -6,5$ mm à $x = +6,5$ mm e voltar, leva em torno de 6 s.

Ao movimentar a partícula, foi utilizada uma câmera digital para filmar o movimento da partícula e foi utilizado o software Tracker⁹ para obter a posição da partícula em função do tempo. A posição obtida experimentalmente foi comparada com a posição de um dos mínimos de potencial de Gor'kov. A comparação entre a posição obtida experimentalmente e a posição determinada numericamente é apresentada na Figura 7. A comparação entre os resultados numéricos e experimentais mostra que a simulação numérica fornece uma boa estimativa para a dependência da posição horizontal da esfera com a diferença de fase entre os dois transdutores.

6. Conclusões

Foi utilizado o Método dos Elementos Finitos para simular um sistema de levitação capaz de manipular partículas no ar. Os resultados obtidos numericamente apresentaram boa concordância com os resultados experimentais, mostrando que a simulação é capaz de prever corretamente a posição de levitação das partículas em função da diferença de fase entre os sinais aplicados aos dois transdutores. Como trabalho futuro, deseja-se aplicar o Método dos Elementos Finitos para desenvolver novos dispositivos para manipulação de partículas em ar.

7. Referências

1. W. J. Xie e B. Wei, Parametric study of single-axis acoustic levitation, *Applied Physics Letters*, **79**, 881-883 (2001)
2. M. A. B. Andrade, F. Buiocchi, e J. C. Adamowski, Finite element analysis and optimization of a single-axis acoustic levitator, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, **57**, 469-479 (2010)
3. L. P. Gor'kov, On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid, *Soviet Physics Doklady*, **6**, 773-775 (1962)
4. D. Foresti, M. Nabavi, M. Klingauf, A. Ferrari, e D. Poulikakos, Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **110**, 12549-12554 (2013)
5. T. Hoshi, Y. Ochiai, e J. Rekimoto, Three-dimensional noncontact manipulation by opposite ultrasonic phased arrays, *Japanese Journal of Applied Physics*, **53**, 07KE07 (2014)
6. T. Kozuka, K. Yasui, T. Tuziuti, A. Towata, e Y. Iida, Acoustic standing-wave field for manipulating in air, *Japanese Journal of Applied Physics*, **47**, 4336-4338 (2008)
7. M. A. B. Andrade, N. Pérez, F. Buiocchi, e J. C. Adamowski, Matrix method for acoustic levitation simulation, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, **58**, 1674-1683 (2011)
8. L. V. King, On the acoustic radiation pressure on spheres, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **147**, 212-240 (1934)
9. D. Brown, *Tracker video analysis and modeling tool*, disponível em <https://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/>

8. Agradecimentos

Nós gostaríamos de agradecer à FAPESP (processo nº 2015/24159-1), ao CNPq e à Petrobras/ANP pelo suporte financeiro a esta pesquisa.