LEVITAÇÃO ACÚSTICA: OBSERVANDO ONDAS SONORAS COM A TÉCNICA DE SCHLIEREN

GIOVANA REIS DO ESPÍRITO SANTO[1], ALEX LINO[2]

[1]Graduanda no curso de Licenciatura em Física, Bolsista de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico (PIBITI), Campus Caraguatatuba, giovana.reis@aluno.ifsp.edu.br

[2] Doutor em Física pela UEM e Docente do IFSP, câmpus Caraguatatuba, alex.lino@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): Física – 1.05.02.03-03 e 1.05.02.02-5

RESUMO: Este projeto tem como objetivo desenvolver um levitador acústico de eixo fixo ultrassônico e utilizar o método de *schlieren* para observar as ondas sonoras produzidas pelo aparato. A técnica de *schlieren* nos permitirá compreender melhor o processo de levitação através da formação de regiões de altas e baixas pressões, verificando as possibilidades de melhoramento do processo. Essa técnica nos permite visualizar regiões de variação de densidade, como no caso em que ocorre a formação de ondas estacionárias, por meio da interferência de ultrassom, gerado pelos transdutores do levitador. Neste trabalho apresentamos a construção do levitador acústico e uma proposta para visualização das ondas sonoras geradas.

PALAVRAS-CHAVE: levitação acústica; experimentação; óptica; ondulatória; técnica de *schlieren*.

1. INTRODUÇÃO

Quase todos nós, quando pequenos, sonhávamos em ter superpoderes, como poder levitar qualquer objeto com o poder da mente ou ver coisas que seres humanos normais não conseguem ver, o "invisível". Com o passar do tempo percebemos que essa ideia é praticamente impossível e que superpoderes não existem. Ao longo da história, descobrimos que não necessitamos de superpoderes, mas que necessitamos da ciência para executar e entender esses fenômenos. Através da ciência é possível ver e compreender que podemos muito mais do que sonhávamos quando crianças, neste caso,

é possível levitar objetos e ver o que seria impossível a olho nu. Com este projeto, pretendemos contemplar essa área da física, levitando pequenos objetos por meio de um levitador acústico e observar as ondas sonoras produzidas, através da técnica de *schlieren*.

Suspender partículas e objetos no ar é basicamente aplicar algum tipo de força que contrabalanceie a força gravitacional. Podemos levitar tais partículas de diversas maneiras, utilizando campos magnéticos, campos eletroestáticos, feixes de laser ou ondas acústicas (ANDRADE; PÉREZ; ADAMOWSKI, 2015). Um dos métodos mais conhecidos é a utilização de campos magnéticos, aonde um objeto metálico pode ser suspenso no ar quando imerso em um campo magnético de grande intensidade. Por meio da levitação óptica podemos usar o fato de que uma onda eletromagnética pode exercer uma pressão de radiação em uma superfície, ou ainda, a levitação eletrostática, onde partículas carregadas são suspensas pela força eletroestática gerada por um forte campo elétrico.

Na técnica de levitação acústica uma partícula pode ser levitada no ar através da força de radiação acústica gerada por uma onda estacionária. Sendo essa técnica utilizada, tanto para levitar pequenas partículas sólidas, quanto liquidas, sem a necessidade de que elas estejam eletricamente carregadas ou magnetizadas. Dito isso, a técnica é relevante para objetos que se deseja manipular ou transpor sem contato, proporcionando a suspensão de objetos frágeis (RAMOS, 2022).

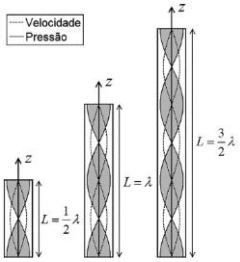
Experimentalmente, vários métodos podem ser utilizados para visualizar os campos acústicos, as ondas sonoras, produzidas pelo levitador acústico. Entretanto, a técnica de *schlieren* apresenta uma opção viável ao caracterizar processos de transferência de calor e massa em fluídos. Para essa análise, a sensibilidade dos métodos de *schlieren* depende da variação do índice de refração do meio e das características dos instrumentos ópticos utilizados (CONTRERAS; MARZO, 2021).

Sabemos que a luz se propaga uniformemente em meios homogêneos de forma retilínea. Portanto, ao passar por um meio heterogêneo a luz sofre desvios por causa da não uniformidade do índice de refração (MACHADO *et al*.,2020). Logo, uma mudança na temperatura ou na pressão produz uma mudança na densidade e consequentemente, produz uma mudança no índice de refração (CONTRERAS; MARZO, 2021).

2. TEORIA

A levitação ocorre devido a ação de uma força de radiação acústica de uma onda estacionária. Este processo ocorre quando uma onda incidente interfere na própria onda refletida em um obstáculo. Esse fenômeno pode ser esquematizado da seguinte maneira:

FIGURA 1. Ondas estacionárias.



Fonte: (ANDRADE; PÉREZ; ADAMOWSKI, 2015, p. 2)

A figura representa uma onda estacionária formada por uma onda mecânica se propagando dentro de um tubo fechado nas duas extremidades. Podemos observar regiões de interferência construtiva (anti-nódos ou ventres) e regiões de interferência destrutiva onde se formam os nós; L representa o tamanho do tubo e λ representa o comprimento de onda da onda estacionária. Podemos observar ainda que nas regiões de nós temos a mínima pressão e velocidade máxima das partículas do meio, assim como, para as posições onde a pressão acústica é máxima, a velocidade das partículas é zero. A equação de pressão acústica para onda estacionária é:

$$p(z, t) = A\cos(\omega t)\cos(kz) \qquad [1]$$

Em que, p(z,t) - pressão dependente da posição z e do tempo t; A - Indica a amplitude da onda resultante; $\omega=2\pi f$ - frequência angular e f a frequência; $k= \omega/c$ - representa o número de onda, com *c* representando a velocidade de propagação da onda. A equação que descreve a velocidade das partículas ao longo do eixo z é:

$$u(z, t) = \frac{\boldsymbol{A}}{\boldsymbol{\rho c}} sen(\omega t)\, sen(kz) \qquad [2]$$

Nesta expressão, ρ representa a densidade do meio.

Para levitar uma partícula é necessário que a força de radiação acústica tenha intensidade igual ao peso. A força que uma onda estacionária exerce em uma partícula esférica de raio R pode ser calculada por meio da teoria de Gor'kov, nos mostrando que a força que atua na partícula deve ser conservativa sendo calculada a partir do potencial U [1]:

$$U = \frac{\pi R^3 A^2}{\rho c^2}\left[\frac{\cos^2(kz)}{3} - \frac{sen^2(kz)}{2}\right] \qquad [3]$$

Com o potencial podemos calcular a força de radiação acústica F pela seguinte expressão:

$$F = -\nabla U = -\frac{\partial U}{\partial z} \qquad [4]$$

Derivando U em relação a z obtemos:

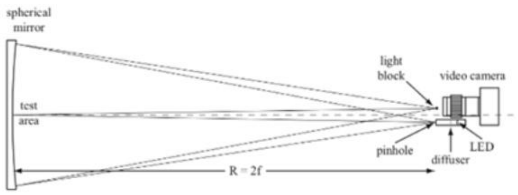
$$F = \frac{5\pi R^3 A^2 k}{6\rho c^2} sen(2kz) \qquad [5]$$

Podemos notar, por meio das equações apresentadas, que as partículas poderão ser levitadas nas regiões de mínimo potencial U. Fazendo uma relação da equação da força de pressão com a equação da força peso, podemos encontrar a mínima amplitude da onda estacionária para que as forças se equilibrem:

$$A_{min} \geq \sqrt{\frac{8}{5}\frac{\rho_{esf}\rho c^2 g}{k}} \qquad [6]$$

Nos mostrando que precisamos de uma amplitude bem elevada para produzir uma força de radiação suficiente para equilibrar um pequeno objeto. A refração devido a não homogeneidade no ar é visível utilizando um sistema simples de espelho com a fotografia de *schlieren*. A refração pode ser vista imediatamente na frente de um espelho concavo. Utilizando uma câmera e um monitor, podemos visualizar a propagação de calor proveniente da chama vela, ou o ar frio saindo de um copo de água gelada. Seu funcionamento consiste em um espelho com uma longa distância focal que é utilizado para focar um ponto de fonte/raio de luz em uma lâmina de navalha que irá atuar como um bloqueador. Posicionado diretamente atrás do bloqueador de luz se encontra uma câmera, que filmará objetos que estiverem na frente do espelho na chamada área de teste, como mostrado na figura 2. Caso ocorra uma mudança no índice de refração do ar na área de teste, a imagem no ponto de luz será levemente defletida. Se essa deflexão passar pelas bordas do bloqueador de luz, a luz adicional que entrar irá aparecer como raios de luz originárias da área onde ocorreu a mudança no índice de refração, esse é o chamado efeito *schlieren*.

FIGURA 2. Efeito Schlieren.



Fonte: Schlieren Optics | Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations.

Fundamentalmente, é a densidade que é responsável pela mudança na refração (n-1), onde n é o índice de refração. Para o ar e outros gases, temos uma relação simples entre o índice de refração e a densidade do gás, ρ, dado por:

$$n - 1 = k\rho \quad [7]$$

Em que, k é o coeficiente de Gladstone-Dale e é praticamente constante para todo o espectro visível. Seu valor é aproximadamente $2{,}3.10^{-4}$ m^3/kg. A expressão para deflexão angular por um gradiente de densidade perpendicular ao eixo óptico, dito dρ/dx, é dado por:

$$\delta = kL\,\frac{d\rho}{dx} \quad [8]$$

Onde, L é o alcance da perturbação na direção do eixo óptico.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para a confecção do levitador utilizamos os seguintes materiais: transdutores de 72x10 mm de 40kHz; arduino nano; amplificador L298N dual motor drive board; power switc de tensão regulável ou fixa entre 9V e 12V; fios de jumper; DC conector fêmea; fios preto e vermelho 12 AWG e 24 AWG; entre outras ferramentas que nos auxiliaram na montagem. Construímos duas bases esféricas através de uma impressora 3D, com material ABS. Nessas bases acoplamos os transdutores e as colocamos dispostas uma contra a outra e distanciadas para que possamos gerar as ondas de interferência entre elas.

Por termos começado o projeto recentemente, a montagem do aparato que utiliza o efeito de *schlieren* ainda não está completamente pronta, pois requer um alinhamento preciso, uma sala com espaço amplo e um espelho esférico de pelo menos 150mm de diâmetro. Para esse efeito consideramos utilizar os seguintes materiais: Fonte de luz (lanterna de LED branco posicionado dentro de um suporte para direcionar a luz, revestido com papel velino para uma iluminação uniforme); bloqueador de luz (Lâmina de navalha ou barbear com um furo central – double edge razor); Espelho esférico côncavo; Vídeo câmera; monitor ou projetor; Suportes; Procedimento de alinhamento.

Após a montagem do aparato experimental, posicionaremos o levitador acústico na área de teste que se encontra à frente do espelho esférico e com o auxílio do vídeo câmera conectado a um monitor, seremos capazes de visualizar a propagação da onda produzida.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como este projeto ainda está em processo, não coletamos os dados finais para realizar as discussões necessárias, ou ainda, observar e compreender melhor o fenômeno discutido. Entretanto, esperamos que com esta pesquisa, possamos verificar os pontos de alta e baixa pressão e comparar com a previsão da teoria. Poderemos ainda verificar a massa máxima que o equipamento consegue levitar. Neste ponto poderemos, a partir da teoria, verificar como podemos aumentar a eficiência do equipamento e fazer a comprovação experimental.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por fim, consideramos que esta pesquisa contribuirá para o melhor entendimento da funcionalidade do levitador acústico, bem como de assuntos relacionados à ondulatória e óptica, podendo ser utilizado por docentes e estudantes que desejam compreender melhor o assunto abordado. Ademais, estamos ansiosos para cumprir os objetivos, observar os resultados e discuti-los em um próximo artigo.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Marco Aurélio Brizzotti; PÉREZ, Nicolás; ADAMOWSKI, Julio Cezar. Levitação acústica. **Revista Brasileira de Ensino de Física,** [s.l.], v. 37, n. 2, p. 2304-1, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/s1806-11173721747. Acesso em: 11 out. 2022.

CONTRERAS, Victor; MARZO, Asier. Adjusting single-axis acoustic levitators in real time using rainbow schlieren deflectometry. **Review Of Scientific Instruments**, [s.l.], v. 92, n. 8, p. 015107-2, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1063/5.0013347. Acesso em: 11 out. 2022.

MACHADO, Danilo Almeida; COSTA, Fernando de Souza; JUNIOR, Demerval Carinhana; OLIVEIRA, Antônio Carlos de. Aplicação do Método Schlieren Ressonante. 2020. **11º Workshop em Engenharia e Tecnologias Espaciais**, 2020. Disponível em: http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m16d/2020/08.13.14.48/doc/3%20-%20%5BARTIGO%5D%5BINPE%5D%20Danilo%20Almeida%20Machado.pdf. Acesso em: 11 out. 2022.

RAMOS, Tiago dos Santos. Força de radiação acústica produzida por ondas estacionárias de ultrassom. 2017. **Tese (Doutorado em Engenharia de Controle e Automação Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo**, 2017. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-06122017-085952/. Acesso em: 11 out. 2022.