

LEVITAÇÃO ACÚSTICA: OBSERVANDO ONDAS ULTRASSÔNICAS COM A TÉCNICA DE SCHLIEREN

GIOVANA REIS DO ESPÍRITO SANTO¹, ALEX LINO²

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

²Doutor 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: Neste trabalho construímos um levitador acústico de eixo fixo ultrassônico e aplicamos o método de Schlieren para observar as ondas acústicas produzidas. Por meio do efeito Schlieren foi possível observar as regiões de alta e baixa pressão que foram produzidas pelos transdutores do levitador acústico. Neste projeto ainda destacamos uma maneira mais simples de verificar o efeito Schlieren utilizando apenas celular e espelho esférico côncavo.

PALAVRAS-CHAVE: levitação acústica; acústica; 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”. 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 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 ultrassônicas produzidas, através da técnica de *schlieren*.

Suspender partículas e objetos no ar significa basicamente aplicar algum tipo de força que contrabalanceie a força gravitacional (ANDRADE; PÉREZ; ADAMOWSKI, 2015). 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 líquidas, 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, 2017).

Experimentalmente, vários métodos podem ser utilizados para visualizar os campos acústicos produzidos 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).

2 TEORIA

2.1 Levitação Acústica

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:

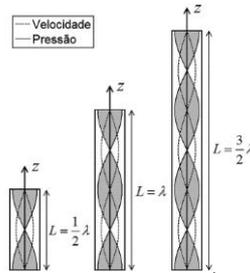


FIGURA 1. Ondas estacionárias (ANDRADE; PÉREZ; ADAMOWSKI, 2015, p. 2).

A figura 1 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:

$$p(z, t) = A \cos(\omega t) \cos(kz) \quad (1)$$

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. Para levitar uma partícula é necessário que a força de radiação acústica tenha intensidade igual ao seu 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 . Com o potencial podemos calcular a força de radiação acústica F pela seguinte expressão:

$$F = -\nabla U = - \frac{\partial U}{\partial z} \quad (2)$$

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. Nos mostrando que precisamos de uma amplitude bem elevada para produzir uma força de radiação suficiente para equilibrar um pequeno objeto. A figura 2 mostra o levitador acústico em funcionamento, levitando uma série de pequenas esferas de isopor.



FIGURA 2. Levitador acústico levitando bolinhas de isopor.

2.2 Efeito Schlieren

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). Essa mudança no índice de refração se torna visível quando utilizamos um sistema simples de espelho, como o efeito Schlieren. A refração pode ser vista imediatamente na frente de um espelho côncavo. 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. Essa mudança no índice de refração causa uma deflexão na luz que aparece como raios de luz originárias da área onde ocorreu a mudança no índice de refração, esse é o chamado efeito Schlieren. A figura 3 mostra um possível arranjo experimental que permite a visualização do efeito.

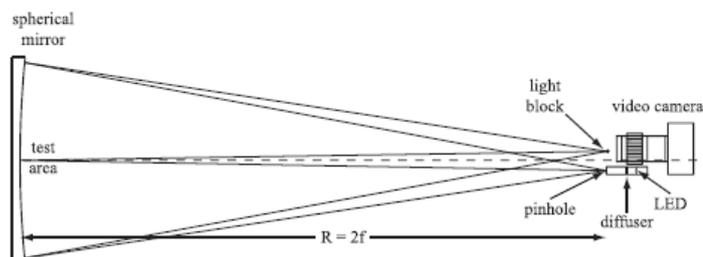


FIGURA 3. Arranjo experimental para visualização do efeito Schlieren (CROCKETT; RUECKNER, 2018)

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:

$$n - 1 = k\rho \quad (3)$$

Em que, k é o coeficiente de Gladstone-Dale e é praticamente constante para todo o espectro visível. Seu valor é aproximadamente $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para a confecção do levitador, foram utilizados os seguintes materiais: transdutores de 72x10 mm de 40kHz; Arduino Nano; placa de amplificação L298N dual motor drive; switch de energia com tensão regulável ou fixa entre 9V e 12V; jumpers;

conector DC fêmea; fios 12 AWG e 24 AWG nas cores preta e vermelha, além de outras ferramentas que auxiliaram na montagem.

Duas bases esféricas foram construídas por meio de uma impressora 3D, utilizando material ABS. Posteriormente, a base foi limpa, removendo as bordas ao redor e os soquetes. A polaridade de cada transdutor foi medida e eles foram acoplados às bases do levitador, com o lado positivo voltado para o centro do aparelho. Em seguida, o fio foi enrolado ao redor das pernas dos transdutores e os fios enrolados foram soldados aos fios que conectam os transdutores à placa do driver. O Arduino foi programado e testado.



FIGURA 4. A base do levitador com os transdutores



FIGURA 5. Fio enrolado nos transdutores.

Para a visualização do efeito Schlieren, foram utilizados os seguintes materiais: um espelho esférico côncavo com pelo menos 150mm de diâmetro (utilizamos o espelho de um telescópio refletor); uma lanterna (utilizamos a do celular); suportes e uma câmera de vídeo (neste caso, utilizamos duas câmeras diferentes para comparar os resultados, o celular e uma câmera profissional).

O espelho foi colocado em um suporte fixo, e o eixo do espelho foi alinhado com a câmera. No efeito Schlieren, era necessária uma fonte quase pontual de luz para que a refração do feixe fosse melhor observada pela câmera. Para obter uma fonte pontual de luz, cortamos um pedaço de fita isolante, fizemos um pequeno furo no meio e colamos na lanterna do celular. Com a lanterna ligada e centralizada com o espelho, começamos a mover a lanterna para encontrar a imagem do ponto de luz, que era o dobro da distância focal do espelho. Ao encontrar essa imagem, posicionamos a câmera nesse ponto, garantindo que o ponto luminoso estivesse no centro da lente da câmera. Em seguida, reduzimos a iluminação da câmera para observar o efeito.

Como teste, acendemos uma vela e a colocamos na frente do espelho para verificar o funcionamento do efeito, conforme mostrado na figura 7. Na imagem, é possível observar a mudança de densidade do ar causada pela chama da vela. Posteriormente, colocamos o levitador acústico em frente ao espelho para observar as ondas sonoras.



FIGURA 6. Aparato para o efeito Schlieren.



FIGURA 7. Ondas de pressão com o efeito Schlieren.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a conclusão da construção do aparato, conseguimos observar o efeito Schlieren de forma muito eficiente. Utilizamos câmeras de diferentes configurações e qualidades, como a câmera de um celular Samsung A51, a câmera de um iPhone 11, uma câmera semiprofissional Canon PowerShot SX520 HS e uma Nikon D610. O efeito em si foi possível analisar em todas as câmeras testadas, ou seja, conseguimos observar as variações de densidade e pressão do ar provocadas por uma vela, um isqueiro e até mesmo um inseticida aerossol, conforme mostram as figuras 8 e 9. No entanto, as ondas do levitador acústico só foram observadas nas lentes do iPhone 11 e da câmera Nikon D610. Isso se deve ao fato de que, para a observação dessas ondas sonoras, é necessário uma câmera de alta qualidade, o que torna o experimento mais dispendioso e de difícil acesso para ser realizado em casa ou em salas de aula.

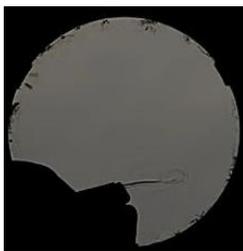


FIGURA 8. Variação da densidade do ar provocada pelo gás de um isqueiro.



FIGURA 9. Variação na densidade do ar provocada pela chama de uma vela.

Com a câmera do iPhone 11, observamos que as ondas sonoras assumiam uma aparência semelhante a escamas, conforme ilustrado na figura 10. Para realizar essa observação, não foi necessário interferir no aparato, ao contrário da câmera (IF), na qual precisamos de uma interferência leve para visualizar as ondas sonoras. Com a câmera profissional, conseguimos registrar as ondas sonoras ao direcionar o gás de um isqueiro de baixo para cima do levitador, provocando uma alteração no índice de refração e permitindo a visualização de algo semelhante às escamas anteriormente observadas nas lentes do iPhone 11, como mostrado na figura 11. Entretanto, na câmera do celular Samsung, não obtivemos o mesmo resultado, possivelmente devido à qualidade da câmera. Ao tentar observar o fenômeno, tanto com o celular Samsung quanto com a câmera Canon SX520, conseguimos apenas visualizar o calor emanando do levitador, mas não conseguimos registrar as ondas sonoras conforme esperado, como ilustrado na figura 12.

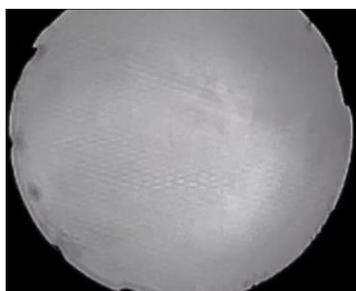


FIGURA 10. Ondas sonoras observadas pelo iPhone 11.



FIGURA 11. Ondas sonoras observadas pela lente da câmera IF.

A comparação entre a visualização experimental das ondas sonoras, obtida através do efeito Schlieren pela câmera Nikon D610 (Figura 11), e a simulação computacional do comportamento dessas ondas no levitador (Figura 13) revelou uma notável congruência entre os dois cenários. A Figura 13 representou a levitação de pequenos pontos entre regiões de alta pressão formadas por ondas estacionárias de ultrassom dos transdutores, e esta configuração foi confirmada pela Figura 11, evidenciando o funcionamento eficaz do levitador nessa instância.



FIGURA 12. Onda de calor do levitador acústico.

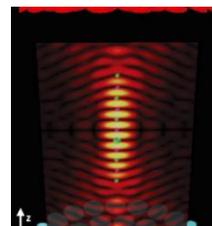


FIGURA 13. Campo acústico simulado (MARZO; BARNES; DRINKWATER, 2017)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este projeto foi concluído com resultados que superaram as expectativas, especialmente ao constatar que a observação do efeito Schlieren não exigia necessariamente uma câmera de alta qualidade. Isso não apenas tornou o experimento mais acessível, permitindo sua reprodução com o uso de uma câmera de smartphone, mas também ampliou seu potencial impacto educacional. O principal objetivo de visualizar ondas sonoras por meio do efeito Schlieren foi plenamente alcançado. Apesar das limitações dos equipamentos, os resultados contribuíram significativamente para o entendimento das ondas sonoras e sua relação com o fenômeno óptico de Schlieren.

6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos o financiamento e o apoio da CNPQ e ao IFSP – campus Caraguatatuba.

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.
- CROCKETT, Allen; RUECKNER, Wolfgang. Visualizing sounds waves with schlieren optics. *American Journal of physics*, 2018.
- 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.
- MARZO, Asier; BARNES, Adrian; DRINKWATER, Bruce W. TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator. *Review of Scientific Instruments* 88, 085105 (2017). Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.4989995>. Acesso em: 28 ago. 2023.