

OBSERVANDO ONDAS ACÚSTICAS 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:

O objetivo desta pesquisa é analisar as ondas sonoras produzidas por um levitador acústico utilizando a técnica de Schlieren. A partir da criação do levitador MidLev, que se baseia em projetos anteriores como o TinyLev e BigLev, testamos diferentes câmeras, indo desde um celular Samsung A51 até uma câmera profissional Nikon D610. Os resultados demonstraram a eficácia da técnica Schlieren na detecção de ondas de pressão originadas por diferentes fontes, como uma vela, um isqueiro e o próprio levitador acústico. Uma descoberta inovadora foi a possibilidade de visualizar o efeito Schlieren com um celular, o que amplia consideravelmente o acesso a essa técnica. No entanto, a eficácia variou entre as diferentes câmeras, sendo que o iPhone 11 e a Nikon D610 obtiveram os melhores resultados. A comparação entre os resultados experimentais e simulações computacionais anteriores ajudam a entender melhor o comportamento das ondas sonoras no levitador acústico.

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

ACOUSTIC LEVITATION: OBSERVING ACOUSTIC WAVES WITH THE SCHLIEREN TECHNIQUE

ABSTRACT: The aim of this research is to analyze the sound waves produced by an acoustic levitator using the Schlieren technique. Starting with the creation of the MidLev levitator, which is based on previous projects such as the TinyLev and BigLev, we tested different cameras, ranging from a Samsung A51 cell phone to a Nikon D610 professional camera. The results demonstrated the effectiveness of the Schlieren technique in detecting pressure waves originating from different sources, such as a candle, a lighter and the acoustic levitator itself. An innovative discovery was the possibility of visualizing the Schlieren effect with a cell phone, which considerably expands access to this technique. However, the effectiveness varied between the different cameras, with the iPhone 11 and Nikon D610 obtaining the best results. The comparison between the experimental results and previous computer simulations helps to better understand the behavior of sound waves in the acoustic levitator.

KEYWORDS: acoustic levitation; experimentation; optics; waves; schlieren technique.

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 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 (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 transportar sem contato, proporcionando a suspensão de objetos frágeis (RAMOS, 2022).

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).

MATERIAL E MÉTODOS

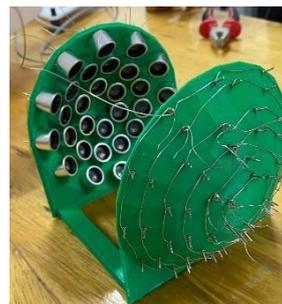
Para a confecção do levitador utilizamos os seguintes materiais: transdutores de 72x10 mm de 40kHz; arduino nano; amplificador L298N dual motor drive board; power switc de tensão regulável ou fixa entre 9V e 12V; fios de jumper; DC conector fêmea; fios preto e vermelho 12 AWG e 24 AWG; entre outras ferramentas que nos auxiliaram na montagem.

Construímos duas bases esféricas através de uma impressora 3D, com material ABS. Depois, limpamos a base retirando as bordas ao redor e os soquetes. Medimos a polaridade de cada transdutor e acoplamos nas bases do levitador de forma a deixar o lado positivo voltado para o centro do aparelho (observe na figura 1). Em seguida, enrolamos o fio ao redor das pernas dos transdutores, de acordo com a figura 2, e soldamos os fios enrolados e os fios que ligam os transdutores à placa driver. Programamos e testamos o Arduino.

FIGURA 1. A base do levitador com os transdutores



FIGURA 2. Fio enrolado nos transdutores.



Para a visualização do efeito Schlieren, utilizamos um espelho côncavo de telescópio, uma lanterna de celular e uma câmera. Testamos quatro câmeras: duas de um celular (iPhone 11 e Samsung A51) e duas profissionais. O espelho foi fixado e alinhado com a câmera, e para obter uma fonte de luz pontual, utilizamos uma fita isolante com um pequeno furo e colamos na lanterna. A lanterna foi ajustada para encontrar o ponto de luz a uma distância igual ao dobro da distância focal do espelho. A câmera foi posicionada de forma a capturar essa imagem, centralizando o ponto luminoso na lente. Conseguimos observar melhor o efeito Schlieren ao reduzir a intensidade da luz, destacando variações na densidade do ar ao usar uma vela e um levitador acústico. Observe nas imagens a seguir o aparato montado (figura 3) e o resultado (figura 4).

FIGURA 3. Aparato para o efeito Schlieren.

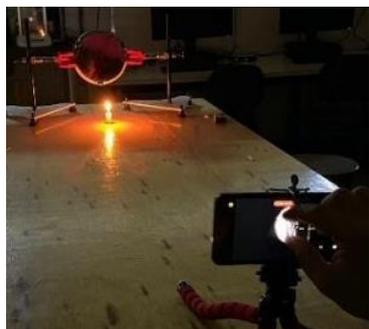
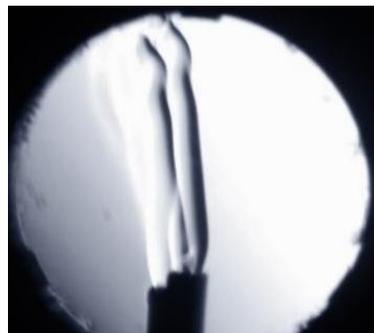


FIGURA 4. Ondas de pressão com o efeito Schlieren.



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.

Nessas ondas, podemos observar regiões de interferência construtiva (anti-nódos ou ventres) e regiões de interferência destrutiva onde se formam os nós. 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:

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

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

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

Podemos notar, 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. Nos mostrando que precisamos de uma amplitude bem elevada para produzir uma força de radiação suficiente para equilibrar um pequeno objeto.

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 conseqüentemente, 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 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. 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.

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 $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$. A expressão para deflexão angular por um gradiente de densidade perpendicular ao eixo óptico, dito $d\rho/dx$, é dado por:

$$\delta = kL \frac{d\rho}{dx} \quad (4)$$

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

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No início, o nosso foco foi a construção do MidLev, um levitador de escala reduzida, uma vez que em projetos anteriores no laboratório construímos os levitadores TinyLev e BigLev. Após concluirmos a construção do aparato, exploramos o fenômeno Schlieren utilizando quatro câmeras, sendo elas: a câmera de um celular Samsung A51, um iPhone 11, uma câmera profissional Canon PowerShot SX520 HS e uma câmera profissional Nikon D610, proporcionando uma análise em diferentes escalas e contextos. Os resultados obtidos nos permitiram observar claramente as ondas de pressão geradas por fontes diversas, como uma vela, um isqueiro e um inseticida aerossol, conforme ilustrado nas Figuras 5 e 6.

Durante o trabalho, ficamos intrigados e felizes quando conseguimos visualizar o efeito Schlieren utilizando a câmera de um celular. Este feito, que até o presente momento tem sido abordado de maneira limitada na literatura científica, representa um marco significativo, ampliando as possibilidades de experimentação em ambientes diversos, como a sala de aula.

A capacidade de capturar o efeito Schlieren com um dispositivo tão acessível quanto um celular promete democratizar a visualização do efeito, a qual, tradicionalmente, exige equipamentos sofisticados e caros, como uma câmera profissional e de alta qualidade, restringindo sua aplicação.

FIGURA 5. Ondas de pressão do gás de um isqueiro.



FIGURA 6. Ondas de pressão de uma vela.



Entretanto, destacamos que a detecção das ondas geradas pelo próprio levitador acústico foi mais eficiente utilizando as lentes do iPhone 11 e da câmera Nikon D610, devido à necessidade de câmeras de alta qualidade para capturar essas ondas sonoras, implicando custos mais elevados e limitações de acesso em ambientes domésticos ou educacionais.

Podemos destacar o interessante padrão visual semelhante a escamas nas ondas sonoras, revelado pela câmera do iPhone 11, conforme evidenciado na Figura 7. Essa característica foi capturada sem intervenções no aparato experimental. Já a câmera Nikon D610 exigiu uma interferência mínima para registrar as ondas sonoras do levitador, introduzindo gás de um isqueiro na região inferior do levitador e provocando uma variação no índice de refração, o que permitiu a visualização de um padrão semelhante ao observado anteriormente nas imagens capturadas pela lente do iPhone 11. Observe a Figura 8.

FIGURA 7. Ondas sonoras observadas pelo iPhone 11.

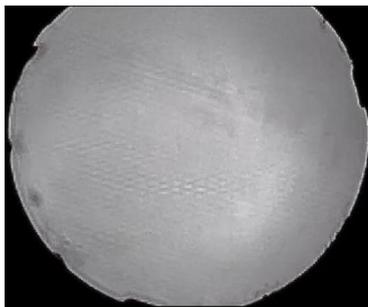
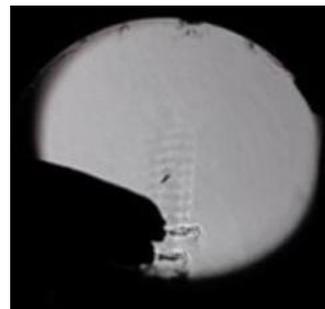


FIGURA 8. Ondas sonoras observadas pela lente da câmera Nikon D610.



É importante ressaltar que os resultados obtidos com a câmera do Samsung A51 não alcançaram o mesmo sucesso, possivelmente devido à limitação na qualidade da câmera. Nas tentativas de observação do fenômeno, tanto com a câmera Samsung quanto com a Canon SX520, apenas o calor proveniente do levitador foi detectado, sendo as ondas sonoras não visíveis conforme o esperado, observe a figura 9.

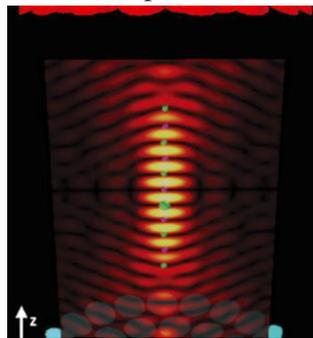
15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

FIGURA 9. Onda de calor do levitador acústico.



No estudo conduzido por MARZO, BARNES e DRINKWATER, em 2017, uma simulação computacional foi realizada para visualizar as ondas de pressão geradas pelo levitador acústico Tinylev (Figura 10).

FIGURA 10. Campo acústico simulado.



Fonte: MARZO, BARNES e DRINKWATER, 2017

A interpretação desses resultados ressalta a complexidade das interações envolvidas. Variações no índice de refração, correlacionadas à densidade do meio, desempenham papel crítico na observação das ondas geradas pelo levitador acústico. A necessidade da qualidade das câmeras confirma os princípios da teoria óptica, sendo necessário equipamentos adequados para a detecção precisa e abrangente desses fenômenos.

É fundamental abordar a falta de trabalhos e pesquisas sobre o assunto da visualização de ondas sonoras, uma vez que, acreditamos que este trabalho é um dos pioneiros neste tema. Sendo assim, temos a certeza de que com a ajuda deste trabalho, podemos abrir uma porta de discussões e desenvolvimento para a ciência, como por exemplo, o uso no ensino-aprendizagem nas aulas de ensino médio para melhor entendimento dos alunos sobre o funcionamento das ondas, ou então, podemos medir o tamanho das ondas estacionárias formadas pelo levitador acústico utilizando as medições com as imagens que conseguimos com esse trabalho.

CONCLUSÕES

Este estudo destaca uma descoberta marcante: a capacidade de visualizar o efeito Schlieren por meio da câmera de um celular, pois, até o presente momento tem sido abordado de maneira limitada na literatura científica. Este avanço é particularmente notável, pois democratiza o acesso à visualização desse fenômeno complexo. Contudo, concluímos que a análise das propriedades das ondas sonoras e a observação do fenômeno Schlieren podem ser enriquecidas pela aplicação de conhecimentos ópticos. A escolha das câmeras e a análise dos resultados contribuíram para uma compreensão mais profunda dos padrões gerados pelas ondas acústicas através do levitador acústico.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

G.R.E.S. realizou o trabalho sob orientação de A.L. Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossos agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram de maneira significativa para a realização deste trabalho. Em especial ao nosso país que nos apoiou financeiramente por meio da CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico). Esse suporte foi essencial para a concretização desta pesquisa. Sem nos esquecer do Instituto Federal de São Paulo - 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.

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.

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.