

Experimentos de mecânica clássica com levitadores acústicos

ALUNO: RAPHAEL LIMA ALVES , DOCENTE: ZWINGLIO DE OLIVEIRA GUIMARÃES FILHO
 Instituto de Física, Universidade de São Paulo -SP

Resumo

A levitação acústica destaca-se como um recurso sólido no ensino de mecânica e ondulatória para graduandos. Este projeto explorou a levitação em experimentos de mecânica, abrangendo oscilações e quedas com resistência do ar. Além disso, enfatizou-se a programação como solução para desafios físicos, como resolver equações diferenciais descrevendo o movimento de corpos sob influência de força acústica e outras forças. O projeto resultou na coautoria de uma apresentação em congresso nacional de ensino de física, acompanhada por um site de apoio que também participei da criação.

I. INTRODUÇÃO

A levitação acústica é uma técnica que se baseia na utilização de ondas sonoras para manipular e controlar objetos sem contato físico. Essa capacidade de levitar usando apenas ondas sonoras possui uma série de aplicações promissoras para auxiliar o estudo da física [2].

O trabalho teve como foco o estudo da levitação acústica em experimentos de mecânica, oferecendo uma abordagem que explora a capacidade de manipulação de objetos por meio de uma força acústica que equilibra o objeto. A figura 1 ilustra a levitação de uma esfera de isopor com aproximadamente 3 mm.

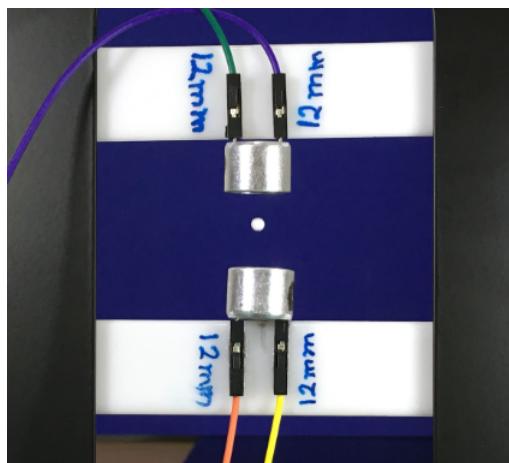


Figura 1: levitação de uma esfera de poliestireno de aproximadamente 3mm os objetos em cinza são emissores ultrassônicos de 12 mm de diâmetro que emitem ondas sonoras de 40kHz

II. MODELO TEÓRICO

A física por trás da levitação consiste no estudo da força acústica produzida por ondas sonoras estacionárias que equilibram a força peso. Ondas sonoras estacionárias consistem em oscilações periódicas que ocorrem com a mesma frequência e na mesma direção, porém em sentidos opostos. Formando um padrão estacionário com a presença de nós e ventres.

A força que uma onda estacionária exerce em uma partícula esférica de raio pequeno pode ser calculada através da teoria de Gor'kov conforme as referências [2] e [4]. De acordo com esta teoria, a força que uma onda estacionária exerce em uma partícula esférica de raio R é conservativa e pode ser calculada através do potencial. Onde U é o potencial de Gor'kov, dado pela equação 1.

$$U = 2\pi R^3 \left[\frac{< p^2 >}{2\rho c} - \frac{\rho < u^2 >}{2} \right] \quad (1)$$

Onde $< p >$ e $< u >$ são as perturbações da onda de pressão e de velocidade, respectivamente devido às ondas sonoras. ρ representa a densidade média do ar e c é a velocidade do som. A teoria de Gor'kov assume que o raio da esfera R é muito menor que o comprimento de onda sonora.

Para um estudo mais aprofundado da força atuante em uma esfera de isopor, foram realizadas simulações do potencial de Gor'kov no espaço entre os emissores, conforme ilustrado na Figura 2. A simulação foi conduzida considerando a velocidade do som de 340 m/s e a densidade do ar de 1,2 kg/m³, com uma frequência de 40 kHz e uma distância de 29 mm entre os emissores. As posições

onde ocorre a levitação ocorrem nos pontos de equilíbrio estáveis, estes ocorrem quando as perturbações da onda de pressão tem o valor mínimo $\langle p^2 \rangle = 0$, porque nesses pontos, em uma onda estacionária plana, o $\langle u^2 \rangle$ será máximo e, portanto, o potencial terá um ponto de mínimo.

Na prática, no entanto, a levitação ocorre ligeiramente abaixo da posição do mínimo de potencial devido à presença da força peso. A força acústica é dirigida para cima e consegue juntamente com o empuxo, equilibrar o peso.

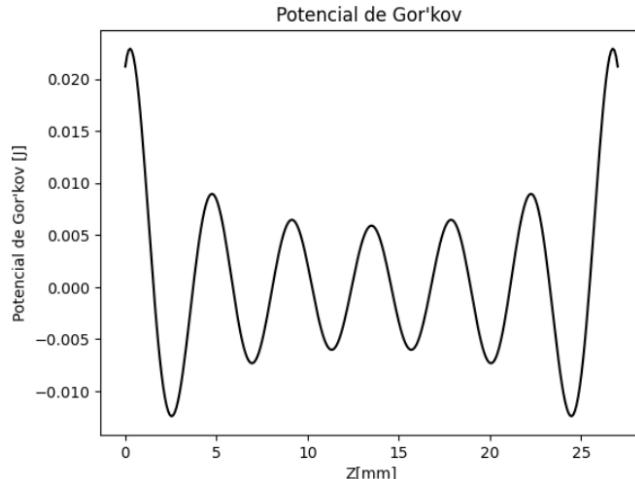


Figura 2: potencial de Gor'kov simulado ao longo do eixo z.

III. ATIVIDADES DO PROJETO

Na perspectiva do bolsista, que assumi a posição em novembro de 2022, a primeira fase envolveu a imersão no estudo da técnica de levitação acústica por meio de artigos disponíveis online. Além disso, busquei me familiarizar com a proposta de montagem prévia do Arduino, já desenvolvida pelo grupo. Dentro desse contexto, dediquei-me a realizar testes e a compreender os componentes básicos de eletrônica relacionados, bem como a compreender o programa de controle utilizado no Arduino.

Na segunda fase, conduzimos experimentos de mecânica utilizando o levitador construído conforme o procedimento proposto pelo grupo. Os experimentos abordaram oscilações amortecidas e movimentos de queda sujeitos à força de arraste. A intenção foi propor atividades experimentais viáveis para disciplinas focadas no estudo de conteúdos de Mecânica.

I. Experimento de queda

O experimento de queda consiste em equilibrar uma esfera de poliestireno com um par de emissores seguindo o esquema da figura 3. Após isso, com o uso do Arduino, é possível controlar as condições para realizar uma queda controlada de uma certa altura.

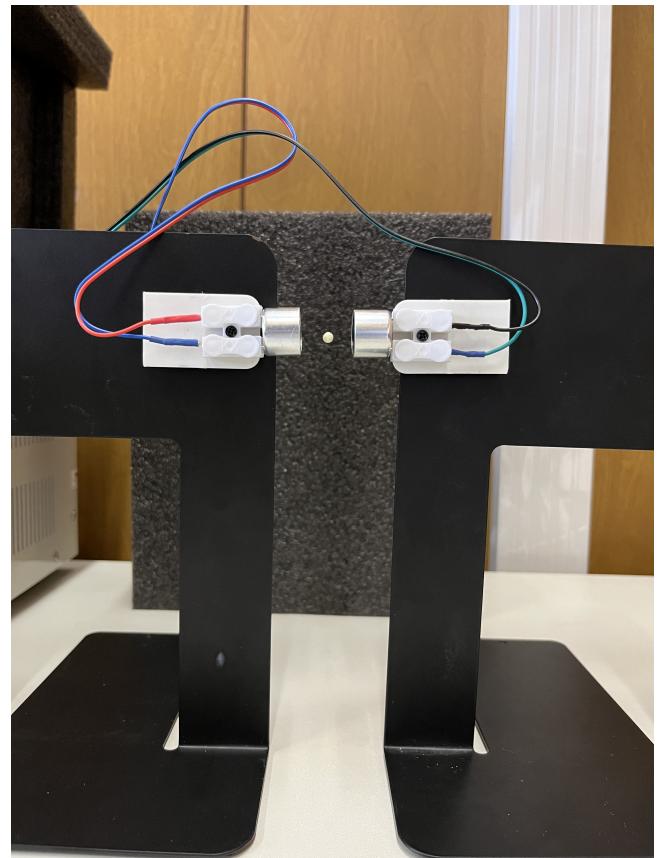


Figura 3: Aparato experimental de queda livre

O experimento é gravado com um celular com uma taxa de aquisição de 120 ou 240 fps. Após a gravação, é realizado um rastreamento com o software Tracker [1] para o estudo da posição do objeto em função do tempo, a fim de avaliar os efeitos da força de arraste e analisar os dados com base na comparação com as soluções numéricas das equações de movimento correspondentes. O resultado obtido por meio do rastreamento no Tracker está apresentado na figura 4.

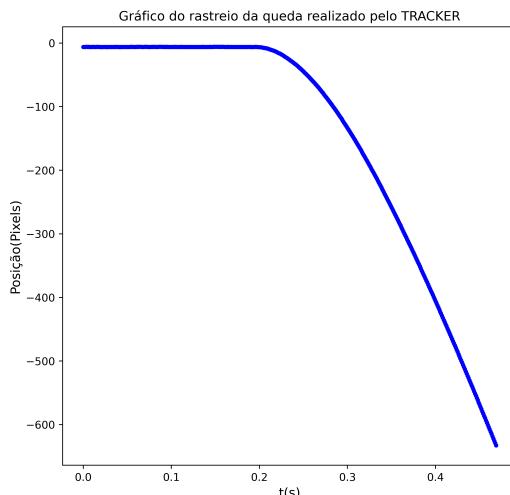


Figura 4: Rastreio realizado pelo TRACKER [1] da posição (pixels) pelo tempo(s)

II. experimentos de oscilações amortecidas

Para realizar os experimentos, foi utilizado um levitador em um único eixo axial com dois emissores emitindo nas frequências de 25 kHz ou 40 kHz, dispostos conforme o esquema da figura 5, a uma distância de aproximadamente 30 mm.

Para que as oscilações ocorram, é necessário interromper a alimentação dos emissores por um intervalo de tempo e, em seguida, religá-los. A força acústica cessa em curtos intervalos de tempo, permitindo assim a realização de oscilações amortecidas, de modo que a amplitude do movimento oscilatório retorne à posição inicial após os emissores serem ligados novamente, estabelecendo assim um movimento de oscilação com amortecimento. Além disso, o experimento é registrado com um celular, com uma taxa de aquisição semelhante ao experimento de queda, operando a uma taxa de 120 ou 240 fps. Após a gravação, é feito um rastreamento utilizando o software Tracker [1] para o estudo das características do movimento, como, por exemplo, o período das oscilações, a fim de analisar onde há uma maior intensidade da força. Isso ocorre porque um período menor das oscilações indica a presença de uma força maior.

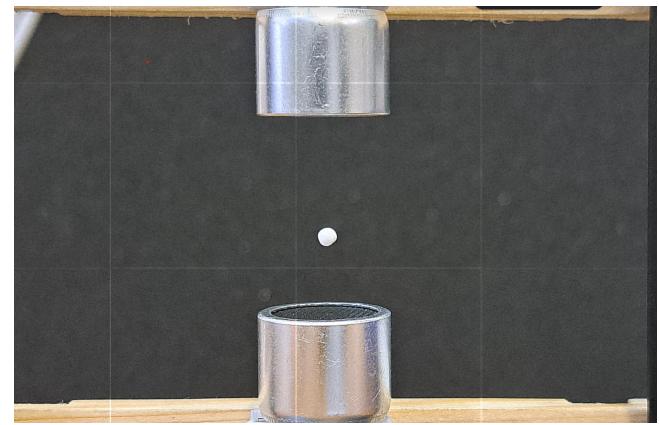


Figura 5: Montagem para o experimento de oscilações , os levitadores estão separados por uma distância de 30 mm

III. Integrações numéricas das equações de movimento

A equação de movimento para corpos sujeitos as forças de arraste podem ser descritos através da equação 2 houve um grande envolvimento (por parte desse bolsista) em estudar e construir as simulações descritas na introdução e no desenvolvimento dos projetos de integração numérica das equações de movimento.

Para o experimento da queda e da oscilação foi resolvida a equação de movimento 2 , onde P é a força peso, E é o empuxo e $F_{arraste}$ é a força de arraste viscoso do ar e $F_{acustica}$ é a força acústica atua como força externa para ocorrer uma oscilação amortecida. Após obter a solução foi possível comparar com os dados do rastreamento do objeto com o Tracker [1]. Desta comparação foi possível estimar os parâmetros físicos necessários para descrever as forças envolvidas nos movimento de queda e de oscilações conforme o gráfico da figura 6.

$$m \cdot \frac{d\vec{V}_z}{dt} = \vec{P} - \vec{E} - \vec{F}_{arraste} - F_{acustica} \quad (2)$$

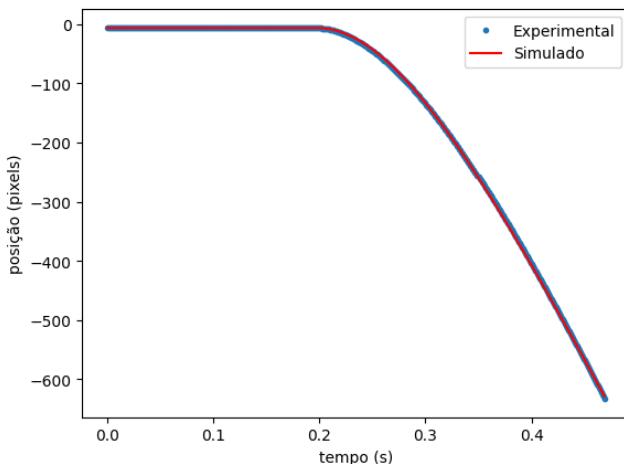


Figura 6: Gráfico do experimento de queda obtido sobreposição da solução numérica da equação de movimento com dados experimentais

IV. Site de divulgação e o projeto em um congresso de física

Após a conclusão das atividades, foi criada uma página de divulgação do projeto, acompanhada por um trabalho submetido ao XXV Simpósio Nacional de Ensino de Física - 2023. A cópia do trabalho submetido pode ser obtida ao visitar a página [5]. Nesse trabalho, no qual atuo como coautor, detalhamos nossos esforços. A página de divulgação destina-se a um público externo ao IF-USP, apresentando a proposta do levitador e uma descrição abrangente dos experimentos realizados. Para acessar essa página e obter informações mais detalhadas, é possível visitar [3]. Este recurso será utilizado como material suplementar durante a apresentação no congresso, sendo especialmente útil para indivíduos interessados em seguir adiante com o desenvolvimento deste projeto.

IV. CONCLUSÃO

O projeto desempenhou um papel fundamental no aprofundamento do meu conhecimento em eletrônica. Antes de me envolver nele, tinha conhecimentos muito limitados na área. Ao longo do projeto, consegui desenvolver habilidades significativas em programação, particularmente na

integração de equações de movimento. Essa experiência prática me proporcionou uma compreensão concreta de como aplicar a computação para resolver problemas da física.

O projeto também me permitiu expandir meu entendimento em conduzir experimentos de maneira significativa. Isso abrangeu aprender a realizar filmagens adequadas, montar equipamentos com precisão e adotar medidas experimentais essenciais para garantir a realização bem-sucedida dos experimentos.

Outro aspecto notável é a evolução na minha aptidão para analisar dados experimentais, o que teve um impacto positivo direto no meu desempenho acadêmico durante o período. Essa progressão é claramente evidenciada pelas avaliações de desempenho nos semestres em que o projeto estava em andamento. No segundo semestre de 2022, por exemplo, completei 26 créditos, compreendendo 24 créditos de aulas e 2 créditos de trabalho, obtendo uma média ponderada de 8.6, sem enfrentar nenhuma reprovação.

Essa ótima tendência se manteve no primeiro semestre de 2023. Com a conclusão de 22 créditos, sendo 20 deles de aulas e 2 de trabalho, obtive uma média ponderada de 8.3, novamente sem enfrentar reprovações.

O projeto não somente ampliou meu conhecimento, mas também teve um impacto positivo em minha trajetória acadêmica.

REFERÊNCIAS

- [1] Open Source Physics Team, TRACKER video Analysis, software gratuito, disponível para download em <https://physlets.org/tracker/> (acessado em 21/08/2023)
- [2] Marco A.B. Andrade. Levitação Acústica. Rev. Bras. Ens. Fis. 37 páginas de 1-4
- [3] <http://portal.if.usp.br/explev/index>
- [4] Nicolás Pérez, Experimental determination of the dynamics of an acoustically levitated sphere. Journal of Applied Physics 116, 184903 (2014);
- [5] <http://www.fap.if.usp.br/zwinglio/>