

## EXPERIMENTOS DE MECÂNICA COM LEVITADORES ACÚSTICOS

Zwinglio Guimarães-Filho<sup>1</sup>, Daniel Ferrareto<sup>1</sup>, Danielle Serafim<sup>1</sup>, Gabriel Sanchez<sup>1</sup>, Guilherme Cavalcanti<sup>1</sup>, Raphael Lima<sup>1</sup>, Nathália Seino<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Física da USP, zwinglio@if.usp.br

<sup>2</sup> Colégio ETAPA

**Palavras-chave:** Levitação Acústica; Laboratório Didático; Arduino.

O objetivo deste trabalho é divulgar uma proposta para a construção e uso de um levitador acústico simplificado adequado para a realização de experimentos de mecânica. A levitação acústica é uma tecnologia em desenvolvimento que visa a manipulação de pequenos objetos, sólidos ou líquidos, apenas por meio da força acústica (ANDRADE, 2015). Por manipular objetos sem contato físico, a levitação pode reduzir o risco de contaminação em aplicações biológicas e farmacológicas.

Em princípio, a levitação poderia ser feita com ondas sonoras de qualquer frequência, porém, como a intensidade sonora é bastante elevada os levitadores utilizam frequências acima do limite de audição humana (em geral, até  $\sim 20$  kHz) chamadas de ultrassom. Por conta disso, como nas configurações usuais de levitadores a dimensão dos objetos levitados deve ser bem menor que o comprimento de onda, o uso do ultrassom implica em um limite superior para a dimensão dos objetos a serem manipulados. No caso de 40 kHz, o comprimento de onda é  $\sim 8,5$  mm, sendo possível levitar bolinhas com menos de 4 mm de diâmetro.

A forma mais comum de levitação se baseia na geração de uma onda estacionária (mais precisamente, com uma componente estacionária significativa) na região de interesse. Por conta de um efeito não-linear surge no objeto uma força acústica que, no caso de objetos esféricos de pequenas dimensões em relação ao comprimento de onda, pode ser associada a um potencial conservativo denominado de potencial de Gor'kov (ANDRADE, 2015). Esse potencial é proporcional ao volume do objeto, de modo que a característica relevante para a levitação é a densidade do objeto, e não sua massa. Assim, em levitadores de baixa potência sonora, como o proposto neste trabalho, os objetos levitados são de isopor (densidade  $\sim 0,025$  kg/m<sup>3</sup>).

No caso de uma onda estacionária plana, o potencial de Gor'kov é mínimo nos nós de pressão, de modo que para pequenos deslocamentos em relação a esses pontos a força acústica age como uma força restauradora. A posição de equilíbrio dos objetos é ligeiramente abaixo dos nós de pressão por conta da necessidade de se compensar a soma das forças peso e empuxo. Objetos colocados próximos à posição de equilíbrio descrevem oscilações amortecidas por conta da força de arrasto.

Para obter a onda estacionária, uma possibilidade é usar dois emissores posicionados frente-a-frente. Outra configuração simples consiste em usar um único emissor apontado para uma superfície refletora plana, de modo que as ondas estacionárias resultem da interação entre as ondas emitidas na direção do refletor com as refletidas nele. No entanto, a intensidade da onda sonora gerada por cada emissor para manter um determinado objeto em levitação nesta configuração é maior que a necessária com o uso de dois emissores frente-a-frente nas mesmas condições.

Outra configuração, ainda relativamente simples, consiste no uso de diversos emissores dispostos de modo a possibilitar uma interferência positiva entre os sinais

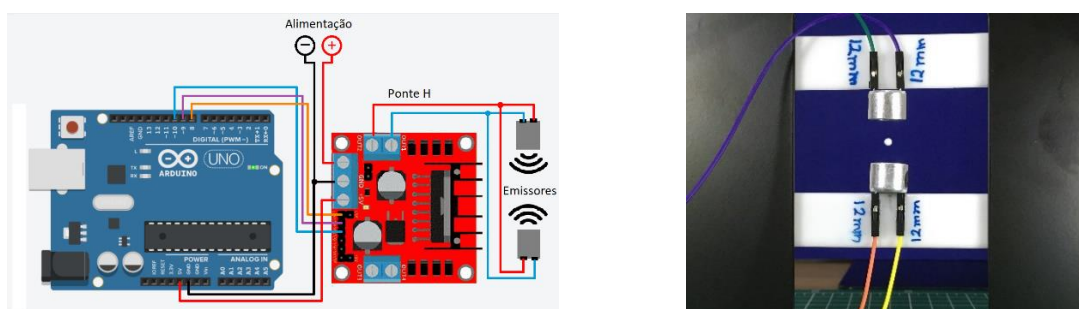
emitidos, de modo a aumentar a intensidade da força acústica para a mesma intensidade de onda sonora gerada em cada emissor. Uma montagem com essa configuração permite levitar objetos com densidade maior que a água (MARZO, 2017).

Há diversos projetos na internet para a construção de levitadores simples usando pequenos emissores ultrassônicos piezoelétricos controlados por Arduino. O uso do Arduino é interessante por permitir gerar os sinais de controle dos emissores com frequência estável na faixa adequada para a levitação, uma vez que a frequência básica dos Arduinos mais comuns (UNO, Nano e Mega) é  $16\text{ MHz}$  e pode-se usar os temporizadores (TIMERS) para garantir a regularidade dos sinais gerados.

Do ponto de vista do controlador do levitador, a diferença principal da proposta deste trabalho é a possibilidade de interromper de modo controlado a alimentação dos emissores. Isso permite fazer experimentos de queda no ar (iniciada pela interrupção abrupta da alimentação dos emissores) e de oscilações amortecidas (iniciada por uma interrupção de curta duração, de até  $16\text{ ms}$ ).

A **Figura 1(a)** apresenta o diagrama das ligações elétricas do controlador do levitador e a **Figura 1(b)** mostra um levitador de dois emissores em uma configuração adequada para estudo de oscilações amortecidas. Detalhes da montagem estão disponíveis na página do projeto (EXPLEV, c2023), mas basicamente envolve a conexão dos terras (negativos) do Arduino e da fonte de alimentação (fio preto no diagrama) e o uso dos sinais do TIMER 1 do Arduino (pinos 9 e 10, fios azul e roxo) para controlar o chaveamento da tensão de alimentação dos emissores por meio de um módulo conhecido como *ponte-H* (sinais “In1” e “In2”), e a ligação de outro sinal digital (o pino 8, fio laranja) para habilitar a alimentação (sinal de “EnA”).

A *ponte-H* é ligada a uma fonte de tensão de corrente contínua (fonte DC) na faixa entre  $9$  e  $24\text{ V}$  e sua função é inverter a polarização dos emissores na frequência do sinal de ultrassom (para  $40\text{ kHz}$  é preciso uma inversão a cada  $12,5\text{ }\mu\text{s}$ , pois são duas inversões por ciclo). Como os emissores são ressonantes numa faixa estreita de frequências, os harmônicos que compõem a onda quadrada do sinal de polarização são fortemente atenuados e a onda sonora emitida é basicamente senoidal.



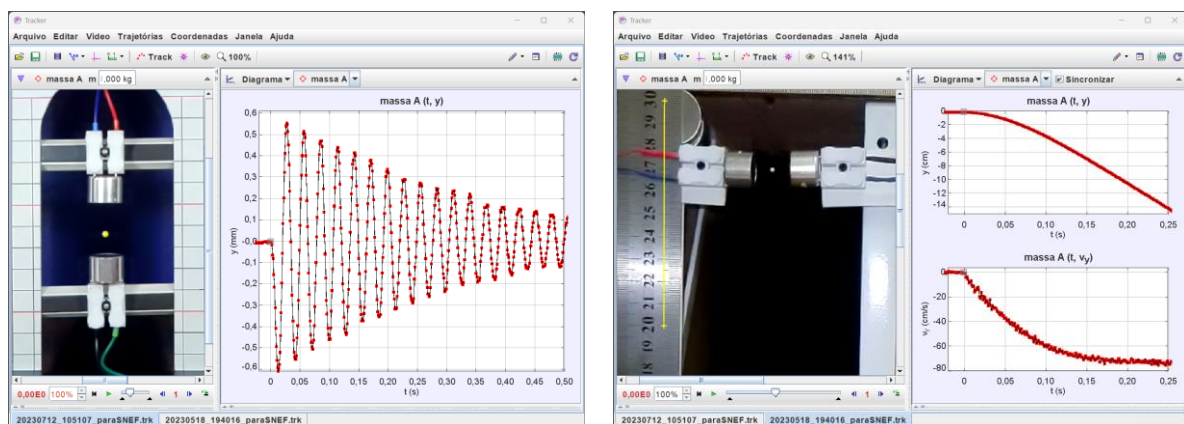
**Figura 1:** (a) Diagrama com o esquema elétrico das ligações entre o Arduino e a ponte-H. (b) Fotografia de um dispositivo de levitação com dois emissores frente-a-frente dispostos de modo adequado a experimentos de oscilações amortecidas.

O programa de controle do levitador pode ser obtido no GitHub (GITHUB, c2023) e consiste basicamente nos comandos para configuração do TIMER (executados uma única vez, quando a rotina inicia) e de comandos para definir o estado do sinal do pino de controle da habilitação da alimentação dos emissores. No programa disponibilizado, há comandos que definem o estado da alimentação dos emissores de forma contínua (“p1” ativa e “p0” inativa), e comandos que a interrompem

por um breve intervalo de tempo (“o#” onde # é o tempo, em milissegundos, em que a alimentação ficará inativa, por exemplo, “o10” interrompe a alimentação por 10 ms).

O registro dos movimentos pode ser feito por filmagens com celular no modo de câmera lenta (120 quadros por segundo ou mais), posteriormente analisadas com programas de rastreamento de imagens em filmes, como o Tracker (OPS, c2023). Para fins de ilustração, a **Figura 2** mostra a tela do Tracker em filmagens com taxa bastante elevada (960 quadros por segundo), feita com um celular *Samsung Note 20*.

Os experimentos da **Figura 2** foram feitos com bolinhas de isopor e ilustram medidas de oscilações amortecidas e de queda, onde se vê que a velocidade vertical fica praticamente constante na parte final da queda. Nos dois experimentos o levitador é composto por dois emissores frente-a-frente, porém, no caso da queda, os emissores foram alinhados horizontalmente para que a queda pudesse ser observada por uma distância bem maior que a separação entre eles.



**Figura 2:** Tela do Tracker com resultados do rastreamento de medidas de oscilações amortecidas após o comando “o10” (esquerda); e de queda após o comando “p0” (direita).

Este trabalho é resultado de um projeto que visa a utilização de levitadores acústicos em aulas de Física e envolve alunos de IC e pré-IC, coautores desta comunicação. O material de divulgação do projeto (EXPLEV, c2023) contém instruções para a construção dos levitadores e sugestões de experimentos, visando o uso em disciplinas experimentais, além de interessados em projetos de eletrônica. Nas próximas etapas, o material de divulgação será ampliado para incluir exemplos de filmagens e resultados de análise, para facilitar seu uso em disciplinas teóricas.

## Referências

ANDRADE, M.A.B. et al., **Levitação Acústica**, Rev. Bras. de Ensino de Física **37**(2), p.2304, 2015.

EXPLEV, **Experimentos com Levitadores**, c2023, disponível em: <http://portal.if.usp.br/explev/index>, último acesso: 11/07/2023.

GITHUB, **Levitador Mínimo controlado por Arduino**, c2023, disponível em: <https://github.com/ExpLev/LevitadorMinimo>, último acesso: 25/06/2023.

MARZO, A. et al., **Particle manipulation by a non-resonant acoustic levitator**, Appl. Phys. Lett. **106**, 035020, 2017.

OPS, **TRACKER Video Analysis**, c2023, disponível para download em: <https://physlets.org/tracker/>, último acesso: 25/06/2023.