



LEVITADOR SÔNICO: UM PRODUTO VISUALMENTE ATRATIVO PARA O ENSINO DE CONCEITOS DE ONDULATÓRIA

Sonic Levitator: A Visually Attractive Product for Teaching Concepts of Wave Mechanics

MÁRCIO F. S. DA COSTA¹, BRUNO GONÇALVES¹, B. F. RIZZUTI², MARLON C. DE ALCANTARA¹

¹Núcleo de Física - Laboratório de Inovação Tecnológica, Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, Juiz de Fora-MG, Brasil

²Departamento de Física, Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora-MG, Brasil

Resumo

Este trabalho apresenta uma forma alternativa de se abordar o conteúdo de ondas estacionárias a partir de um produto que denominamos Levitador Sônico. Os livros didáticos tradicionais mostram figuras que podem fazer os estudantes criarem concepções que não condizem com aquelas que concordam com a descrição matemática do fenômeno apresentado. Argumentamos então como construir o Levitador Sônico de baixo custo com um microcontrolador Arduino, que ajuda a motivar o tema de ondulatória para os alunos. Usando o aparato como exemplo, elaboramos um texto didático, baseado na modelagem analítica, como sugestão para suprir tal lacuna da literatura convencional deixada nos livros didáticos.

Palavras-chave: Ondas estacionárias. Levitação acústica. Livros didáticos.

Abstract

This work shows an alternative approach to teach the stationary waves subject based on a product we shall call Levitador Sônico. The figures present in traditional didactic books may induce some misconceptions related to the mathematical description of the phenomena. We describe the construction of the low cost Levitador Sônico (Arduino based) which can be very helpful to generate engagement to the wave theory study. Using the product as an example, we produced a didactic text, based on the mathematical model, as a suggestion to fill such gap in the standard literature.

Keywords: *Standing waves. Acoustic levitation. Didactic books.*

I. INTRODUÇÃO

A levitação acústica é um fenômeno previsto teoricamente há certo tempo (KING, 1934; GORKOV, 1961; BRILLOUIN, 1936). Devido às suas diversas possibilidades de aplicação, esse efeito atrai a atenção de cientistas de distintas áreas como a biologia, a química analítica, a farmácia e também em outros campos tecnológicos. Dentre uma de suas aplicações, a levitação pode ser usada como uma maneira de se evitar contatos ao redor de amostras, contornando o principal problema de miniaturização. As técnicas de levitação por ultrassom foram desenvolvidas como uma ferramenta promissora para estudar as propriedades de materiais fundidos, a forma de equilíbrio e a estabilidade das gotas líquidas (ZANG et al., 2017, p. 77-85). A temperatura e a transferência de massa em gotas levitadas também foram descritas, assim como as aplicações de cristalização e microgravidade (SANTESSON, 2004, p. 1704-1709). Tais técnicas podem ser usadas para evitar a agregação de glóbulos vermelhos, as quais têm um avanço significativo na manipulação tridimensional de agregados e auxiliares celulares para controlar e manobrar células no futuro (GYUN et al., 2018, p. 1-3). Uma revisão moderna sobre o assunto pode ser vista em Andrade et al. (2018).

A levitação acústica é extremamente intrigante por desafiar nosso senso comum, uma vez que não há nenhum efeito eletromagnético ou aerodinâmico aparente que possa explicá-la. Por estes motivos, mas não somente, exploramos neste trabalho o caráter curioso da levitação acústica como ferramenta didática. Para tanto, desenvolvemos um equipamento chamado Levitador Sônico, capaz de manter pequenos pedaços de materiais de baixa densidade flutuando em posições estáveis. Entendemos que tal aparato pode ser útil para promover a interação entre os alunos e o conhecimento científico associado às ondas sonoras. Também entendemos que a inserção do aluno em um meio inovador pode potencializar o interesse desses estudantes em atividades de ensino.

Apresentamos uma visão geral da teoria da levitação acústica de objetos de baixa densidade. A levitação acústica usa pressão de radiação acústica para equilibrar a força de gravidade e suspender a matéria no ar. O comportamento do levitador é previsto

numericamente aplicando um modelo para calcular um potencial de força para a radiação acústica no lugar do cálculo usual da pressão de radiação (GORKOV, 1961, p. 88-91).

Paralelamente à montagem do Levitador Sônico, também fizemos um levantamento de como os livros didáticos utilizados na rede pública no Brasil abordam o tema de oscilações e ondas. Em muitos casos, eles introduzem ondas sonoras estacionárias somente após mostrarem ondas estacionárias em cordas, ilustrando principalmente harmônicos em violões. Julgamos que essa abordagem pode produzir deturpações nas percepções dos alunos, se as ondas sonoras mostrarem apenas o movimento horizontal representado por gráficos que parecem apresentar deslocamentos verticais. Nesse sentido, o Levitador, imerso em uma atividade de ensino, pode ajudar a preencher tal lacuna. Para tanto, sugere-se uma possibilidade de aplicação do produto em sala de aula.

O trabalho ficou dividido da seguinte maneira: na próxima seção, será apresentada uma crítica à maneira como diversos livros didáticos abordam inicialmente o tema das ondas sonoras. Na sequência, daremos os detalhes de construção, funcionamento e modelagem matemática do Levitador. Discute-se então uma possibilidade de aplicação do produto em sala de aula e, por fim, as conclusões.

II. CRÍTICA À FIGURA CLÁSSICA DE ONDAS SONORAS NOS LIVROS DO PNLD

No ensino de ciências, a visualização pode ser uma extraordinária maneira de entender como os fenômenos ocorrem, e como o modelo matemático está conectado ao referido fenômeno. Nesta seção, discutiremos a conexão da teoria com a representação das ondas sonoras nos livros didáticos brasileiros. Entende-se que ondas sonoras são longitudinais uma vez que a direção de propagação se dá no mesmo eixo de direção da oscilação. Para introduzir este conteúdo no ensino de ciências, é comum começar uma breve explicação sobre as características e propriedades das ondas transversais e ondas longitudinais. Para as ondas longitudinais, alguns livros ilustram esse tipo de onda associada à imagem de molas. Também, é bastante comum observar ondas sonoras como frentes de onda circulares bidimensionais.

No entanto, não é comum ver a onda sonora como uma representação da pressão do ar e das alterações de densidade. Nas escolas públicas brasileiras, os livros didáticos são fornecidos pelo governo federal, através do Programa Nacional do Livro e do Material Didático (PNLD). Esses livros são continuamente avaliados e são realizadas modificações ao longo do programa. Jardim, Otoyá e Oliveira (2015) afirmaram que essas avaliações mostram que em 2009, os livros didáticos de física analisados apresentaram uma taxa de falha de 73%. Entretanto, os mesmos autores afirmam que em 2015 o índice reduziu para 35%. A discussão sobre os livros didáticos do PNLD é importante porque a maioria dos estudantes de escolas públicas no Brasil tem acesso a esse tipo de publicação.

Procurando conectar nosso instrumento (Levitador Sônico) com o conteúdo de ondas sonoras proposto nos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) (BRASIL, 2002) para estudantes do ensino médio, é preciso observar como os livros didáticos brasileiros explicam e representam o conceito de ondas sonoras estacionárias. Foram avaliados dez livros didáticos

de Física para o ensino médio do PNLD¹ utilizados nos últimos sete anos, cinco para o triênio (2015 a 2017) e cinco de diferentes autores aprovados para (2018 a 2020). Observou-se que nove dos dez livros didáticos possuem um capítulo ou unidade específica de ondas sonoras, e um livro principalmente apresentou este capítulo após o capítulo geral sobre ondas.

Este trabalho também foi feito para as sete coleções do PNLD 2021 (Objeto2)² que, em acordo com a Base Nacional Comum Curricular (BRASIL, 2018), situam os conteúdos de Física, Química e Biologia em um único grupo, denominado Ciências da Natureza e suas Tecnologias.

Nesta avaliação, analisamos três parâmetros, a saber: 1 - Se o livro possui uma descrição de onda sonora como uma onda longitudinal; 2 - Se o livro usa imagens corretas para representar ondas sonoras como frente de onda (FO), e onda como representação das variações de pressão e densidade do ar (PD); 3 - Se o livro representa as ondas sonoras estacionárias como zonas de rarefação e compressão.

A partir da Tabela 1, podemos observar que a maioria dos livros didáticos analisados mostra a onda sonora como uma onda longitudinal, e representa corretamente as características de pressão e densidade. No entanto, nenhum deles descreve nas imagens as ondas sonoras estacionárias com as características de densidade e pressão. Essa situação também é observada por Vieira, Amaral e Lara (VIEIRA et al., 2014, p. 1-5), quando esses autores criticam e fazem sugestões sobre ondas sonoras em livros didáticos do ensino médio. A partir deste artigo, publicado em 2014, podemos observar que esse cenário não mudou, ou não mudou suficientemente, nos livros didáticos.

LIVROS DIDÁTICOS					
(2015-2017) 5 Livros		(2018-2020) 5 Livros		PNLD 2021 (Objeto 2) 7 Coleções (42 livros)	
1	5	1	5	1	6
2	(FO) 5	2	(FO) - 5	2	5
	(PD) 4		(PD) - 5		4
3	nenhum	3	nenhum	3	nenhum

Tabela 1: Avaliação dos livros didáticos.

Os detalhes sobre a importância da representação de ondas sonoras estacionárias, focando em densidade e pressão, foram discutidos por Russel (2012). Em muitos casos, os livros didáticos brasileiros introduzem ondas sonoras estacionárias após trabalharem com ondas estacionárias em cordas vibrantes, ilustrando principalmente os harmônicos em uma corda de violão. Caso as ondas sonoras estacionárias mostrassem somente a oscilação horizontal representada por gráficos que parecem oscilar verticalmente, como a imagem da Figura 1, então tal abordagem poderia gerar equívocos nas percepções dos alunos.

¹Os livros analisados didáticos do PNLD triênios (2015 a 2017) e (2018 a 2020) encontram-se em uma tabela no Anexo A.

²Disponível em: <https://pnld.nees.ufal.br/pnld_2021_didatico/inicio>. Acesso em: 26 jul. 2022.

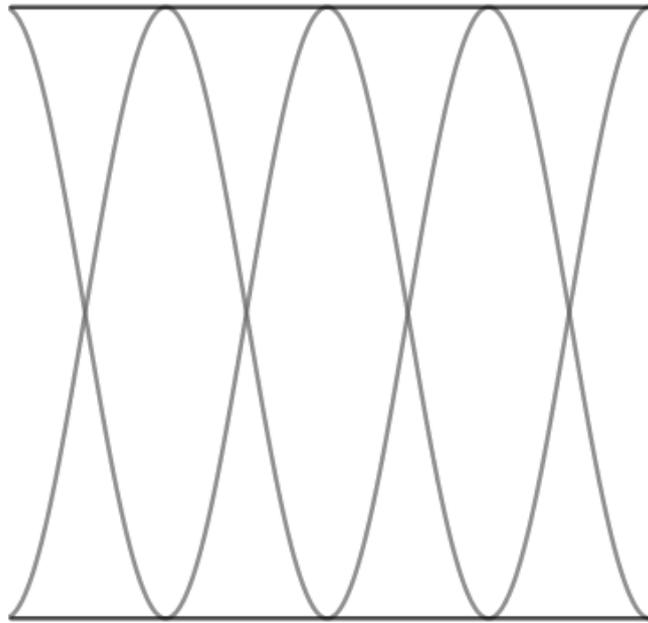


Figura 1: Representação de uma onda sonora estacionária que poderia induzir o leitor ao erro: oscilação vertical ou horizontal?

Nesse caso, entendemos que é importante introduzir um modelo matemático em forma de imagem, que possa representar as compressões, rarefações de densidade e pressão e depois usar a representação comum como mostrado na Figura 2.

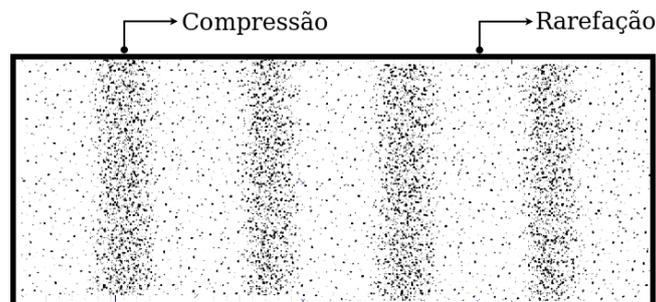


Figura 2: Zonas de compressão e rarefação de uma onda estacionária.

Nossa crítica aos livros didáticos não é feita a partir do conteúdo científico dos mesmos, mas em uma passagem direta do modelo harmônico de cordas para o modelo harmônico de tubos, sem passar pela apresentação de imagens do modelo de ondas sonoras estacionárias concebidas por características de densidade e pressão. Nesse sentido, o instrumento Levitador, amparado por uma sequência didática bem construída, pode ajudar a entender as ondas sonoras estacionárias em tubos, possibilitando de forma mais consistente, demonstrar as zonas de maior e menor densidade, bem como, as diferenças de pressão ao longo da onda estacionária, conforme mostrado nas imagens das Figuras 2 e 3. Este será exatamente o caminho que será tomado nas próximas seções: detalharemos a construção do Levitador, seguido de uma breve explicação matemática do seu funcionamento, culminando com uma possível aplicação do produto em sala de aula.

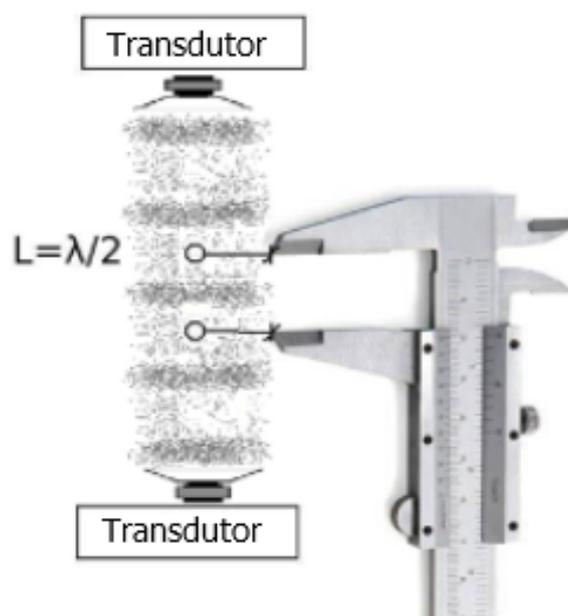


Figura 3: Ondas sonoras na vertical como deslocamento e pressão no Levitador, mantendo as esferas de isopor flutuando.

III. CONSTRUÇÃO E FUNCIONAMENTO DO LEVITADOR

Nosso sistema de levitação acústica é formado por dois transdutores de ultrassom, que operam numa frequência de 40kHz e possuem uma face circular de 16mm de diâmetro. Os dois transdutores estão na posição vertical com as faces viradas entre si (MARZO, 2017, p. 085105-085110). A distância entre os transdutores é de aproximadamente de 14,7mm. Para excitar eletricamente esses transdutores é utilizado um microcontrolador Arduino UNO, que opera como um gerador de funções. O código para executar esta função encontra-se no Anexo B. Para montar o Levitador Sônico, usamos os seguintes componentes elétricos/eletrônicos enumerados abaixo com a respectiva legenda na Figura 4:

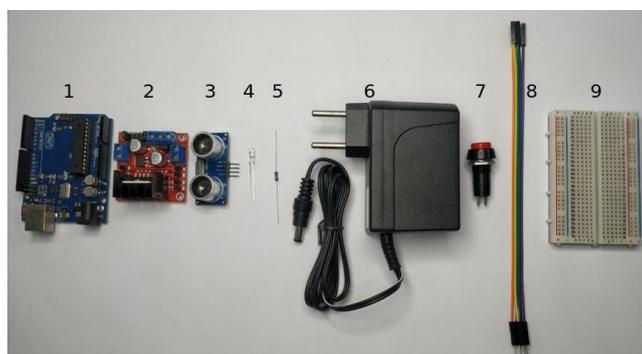


Figura 4: Componentes para montagem do Levitador.

1. Um microcontrolador Arduino UNO (prototipagem eletrônica de plataforma de código aberto com hardware e software flexível e fácil de usar);

2. Um driver motor bridge H-L298N (é um circuito eletrônico de potência que pode determinar a direção da corrente, a polaridade da tensão e a tensão em um determinado sistema ou componente);
3. Dois sensores ultrassônicos HC-SR04 (utilizados na emissão de sinais ultrassônicos pelo sensor e na leitura do sinal de retorno - reflexão/eco - do mesmo);
4. Um LED com 3mm de diâmetro de alto brilho vermelho, que funciona como lâmpada piloto;
5. Um resistor de 220 Ω ;
6. Uma fonte 12 Volts (especificações: marca UNITEL, entrada: 100-240 AC, saída: 12V DC, corrente: 1A);
7. Um switch button (especificações: marca Daie; modelo PBS 11A; tensão 12V; corrente máxima na chave 3A/250V);
8. Vários jumpers.
9. Uma protoboard.

Para a montagem devemos seguir alguns passos:

a) Retira-se o transdutor do sensor ultrassônico HC-SR04. Para isso, usamos um ferro de solda que servirá para aquecer a solda que o conecta ao sensor e com o sugador, retira-se a peça do circuito impresso. Para identificar qual dos sensores é o transdutor, procura-se visualizar o que tem a letra T escrita no circuito, que também possui uma marcação na parte frontal do sensor. Atrás de cada transdutor, atentar para uma protuberância que indica a polaridade, verificando que com a protuberância é a polaridade positiva, e sem, a negativa. Tais detalhes podem ser vistos na Figura 5.



Figura 5: Detalhes do transdutor retirado do sensor ultrassônico.

b) Conecta-se o polo negativo da fonte à protoboard com um jumper. O polo positivo da fonte é conectado à protoboard por um switch button usando jumpers para fazer as ligações devidas.

c) Após a retirada dos transdutores, realiza-se a ligação dos dois pinos positivos dos dois transdutores na porta in e os outros dois pinos negativos dos mesmos transdutores na

porta out do driver motor bridge H-L298N. Liga-se na porta 635V o pino positivo, e no pino GND o negativo da protoboard.

d) A porta IN1(IN2) do driver motor é conectada à porta A2(A1) do Arduino.

e) Solda-se um resistor 220 na perna de maior comprimento do LED (positivo), que é conectada ao Arduino (perna positiva no 5V e a outra no GND).

f) O Arduino será alimentado pela fonte de 12V. Para isso, ligamos dois jumpers, saindo da protoboard já energizada, sendo que o polo positivo é conectado ao Vin e o negativo no GND.

Os componentes e o esquema de montagem descritos acima podem ser vistos na Figura 6, representando o protótipo do produto.

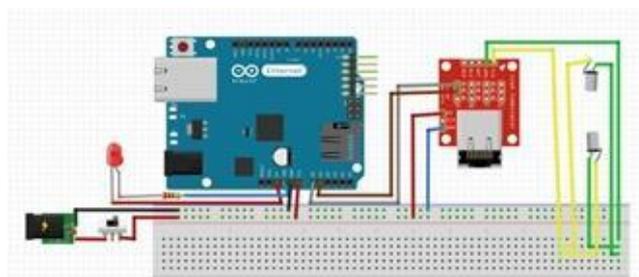


Figura 6: Esquema de montagem da parte eletrônica do Levitador.

Já na sua versão final, podemos ver o circuito do Levitador envolto por uma caixa plástica, sendo que um dos transdutores fica preso à caixa e o outro a um suporte feito com PVC. Sua altura pode ser ajustada por uma borboleta. Os detalhes estão na Figura 7. Seguimos ainda os seguintes passos para a montagem final do Levitador:

a) Sugere-se armazenar as pequenas esferas de isopor em um recipiente para evitar que elas se espalhem durante a utilização do produto.

b) Construimos uma mini escumadeira (especificações: 10,3cm de comprimento, 5,25mm de diâmetro de base, 14mm de diâmetro de concha) utilizada para colocar as pequenas esferas de isopor levitando entre os dois transdutores.

c) Confeccionou-se um cabo de verificação, com fio fino, fazendo um arco circular na extremidade. Ao passar o arco envolvendo as esferas, legitima-se o experimento, comprovando que as esferas não estão penduradas por um suposto fio.

A Figura 7 também mostra o aparato em funcionamento, com pequenas esferas de isopor levitando.

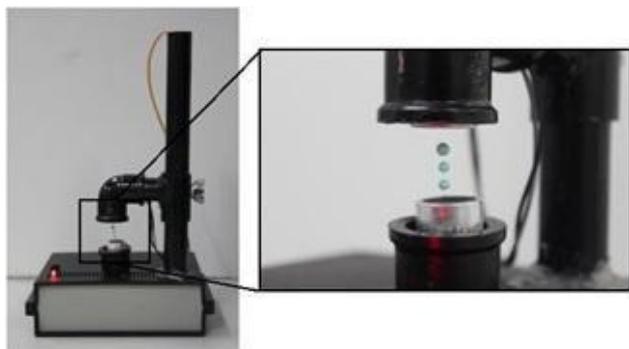


Figura 7: Zoom detalhando as esferas de isopor levitando.

Os detalhes do cabo de verificação e da escumadeira depositando uma esfera são exibidos na Figura 8.



Figura 8: Levitador em funcionamento.

IV. UMA BREVE DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DA LEVITAÇÃO ACÚSTICA

A descrição matemática exata da levitação acústica não é um problema trivial. Em princípio, encontra-se o campo de pressão P na região espacial onde as pequenas esferas levitam e escrevemos imediatamente:

$$\vec{F} = - \iint_{(sph)} P d\vec{S} \quad (1)$$

Esta expressão fornece a força de radiação acústica à qual as esferas estão sujeitas. (sph) significa a superfície de cada esfera. O problema aqui é exatamente como encontrar o campo de pressão de radiação. Iremos discutir qualitativamente esta questão. Existem três variáveis

usadas para descrever o fluido: a densidade ρ , a velocidade u e a pressão P . As equações que devem ser resolvidas no problema são:

- (i) uma equação de continuidade relacionada à conservação de massa;
- (ii) a conservação do momento e, finalmente,
- (iii) a equação de estado, que relaciona pressão e densidade (Andrade et al, 2018, p. 190).

O conjunto das equações nas etapas (i) - (iii) geralmente é resolvido assumindo pequenas variações dos campos ρ , \vec{u} e P . Dentro desse regime, juntamente com algumas simplificações extras, como as esferas serem rígidas e o fluido invíscido, a pressão satisfaz uma equação de onda. A dependência do tempo da solução correspondente é fornecida por um termo no formato $P_1 \sim \cos \omega t$, em que P_1 representa a aproximação de primeira ordem.

As aplicações padrão da radiação acústica, incluindo o próprio dispositivo aqui desenvolvido, usam alta frequência. Por outro lado, efeitos observáveis ocorrem em uma escala de tempo mais lenta que a de P_1 . Assim, é natural avaliar a média de tempo correspondente, que é nula.

$$\langle P_1 \rangle \sim \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \cos(\omega t) dt = 0. \quad (2)$$

Neste caso, a força média sobre as esferas seria nula e elas não ficariam equilibradas. Portanto, somos forçados a considerar uma aproximação de segunda ordem para obter a pressão/força da radiação sobre as esferas. Esse fato foi observado como uma crítica severa que o próprio Lord Rayleigh (1842-1919) havia recebido de Léon Brillouin (1889-1969), aqui reproduzido:

Lord Rayleigh dedicou várias memórias à pesquisa sobre a pressão de radiação das ondas sonoras, mas seus cálculos são imprecisos devido a vários erros de detalhes; [...]; deve-se levar em conta toda uma série de efeitos de segunda ordem... (BRILLOUIN, 1936, p. 99-111, tradução nossa.)

A expressão da força de radiação acústica que atua em uma pequena esfera em um campo arbitrário foi derivada em 1961 por L. Gor'Kov (1929-2016). Nesse caso em particular, embora tenhamos uma força de contato que atua sobre a superfície do objeto no fluido, Gor'Kov deduziu um potencial U onde a esfera está imersa, de modo que $\vec{F} = -\nabla U$. Tanto o potencial quanto a força são dados por:

$$U = \frac{P_0^2 \pi R^3}{\rho_0 u_0^2} \left[\frac{\cos^2(kz)}{3} - \frac{\sin^2(kz)}{2} \right] \Rightarrow \vec{F} = \frac{5\pi R^3 k P_0^2}{6\rho_0 u_0^2} \sin(2kz) \hat{k}. \quad (3)$$

A fórmula é idêntica à expressão encontrada quase 30 anos antes por Louis Vessot King (KING, 1934, p. 212-240). Neste caso, R é o raio das esferas, k é o número de onda, P_0 , ρ_0 e u correspondem à pressão, densidade e velocidade sem perturbação. O eixo z conecta os dois transdutores em nossa configuração e tem vetor unitário designado por \hat{k} .

Veremos até que ponto esse modelo pode ser aplicável em nosso esquema. Uma das suposições de Gor'Kov é que $R \ll \lambda$, no qual λ representa o comprimento de onda acústico.

Primeiro de tudo, o raio de nossas esferas é de cerca de $R = 1,5 \text{ mm}$. O comprimento de onda da onda sonora em 40.000 Hz é $\lambda = 8,5 \text{ mm}$, onde utilizou-se $u_0 = 340 \text{ m/s}$. Não podemos dizer que R seja muito menor que o comprimento de onda acústico, mas o primeiro é quase 6 vezes maior que R . O fato é que as esferas levitam, como exibido na Figura 7. Além disso, nossas esferas são feitas de isopor (poliestireno expandido), com densidade de 25 kg/m^3 . Com o raio acima, estimamos sua massa, $M = 3,5 \times 10^{-6} \text{ kg}$ e peso $W = Mg = 3,5 \times 10^{-6} \text{ N}$. Por simplicidade, consideramos $g = 10 \text{ m/s}^2$. A força máxima que a equação 3 fornece é dada por:

$$|\vec{F}| = \frac{5\pi R^3 k P_0^2}{6\rho_0 u_0^2} = 0.43 \text{ N}. \quad (4)$$

Os valores usados são os padrões: $P_0 = 10^5 \text{ N/m}^2$, $\rho_0 = 1.3 \text{ kg/m}^3$, $u_0 = 340 \text{ m/s}$ e $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Este cálculo mostra que as forças de radiação acústica envolvidas são muito maiores que o peso das esferas. Dito isto, como o modelo com o potencial se aplica aqui?

Na Figura 9, esboçamos o potencial em função de z e logo abaixo do gráfico, as esferas levitadoras. O gráfico do potencial é uma função periódica, com pontos mínimos distintos: a distância um do outro pode ser obtida a partir da força e é dada por $\lambda/2$.

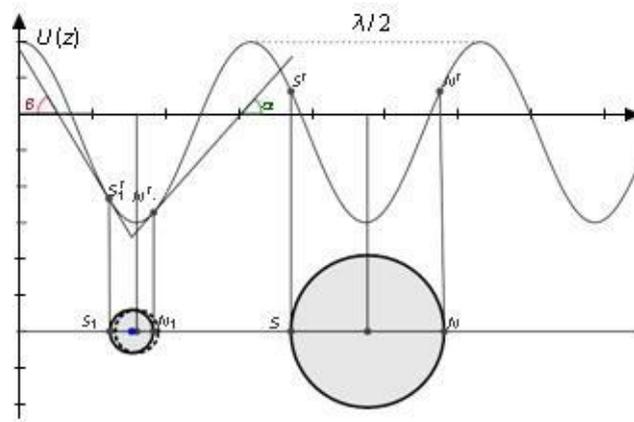


Figura 9: Esboço das esferas presas no potencial de GorKov.

De fato, para equilibrar a força devemos ter $2kz_n = n\pi$, onde $n \in \mathbb{N}$. Assim, entre um ponto mínimo e outro, temos:

$$2kL = 2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) L = 2\pi \Rightarrow L = \frac{\lambda}{2} \quad (5)$$

Esse fato também pode ser explorado em atividades didáticas, como será discutido na próxima seção. Tais pontos são de equilíbrio estável no sentido de que, para pequenos deslocamentos na variável de posição, a força que a pequena esfera sente sempre é restauradora. Por causa de sua separação, o polo norte e o polo sul, denotados por N e S na Figura 9, caem numa posição em que a força restauradora sobre tais pontos, dada por $0,43 \text{ N} \sin \left(2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) R \right) \approx 0,37 \text{ N}$, ainda é muito maior que o peso. Como é claro na Figura 9, a simetria do gráfico nos permite concluir que as forças correspondentes são iguais e, portanto, a esfera permanece imóvel. Apesar do peso ser tão pequeno, será que podemos

negligenciá-lo? Afinal, se o som estiver desligado, a esfera cai. A resposta a esta pergunta, na verdade, explica uma das razões pelas quais o modelo de Gor'Kov pede que $R \ll \lambda$. Voltemos nossa atenção para a esfera menor na Figura 9. Nesse caso, o raio é cerca de 15 vezes menor que λ . Se a esfera é puxada pelo peso, a força que ela sente no polo norte N_1 é menor que a força no polo oposto, S_1 : esse fato é explorado pela comparação entre as inclinações das tangentes à curva de potencial nos pontos N_1 e S_1 ($\alpha < \beta$). Assim, as esferas tendem a retornar ao mínimo de potencial, ali permanecendo estáticas. Como mencionado na introdução, para uma revisão abrangente e atual sobre o assunto, sugere-se o artigo (ANDRADE et al., 2018, p. 190).

V. POSSIBILIDADE DE APLICAÇÃO EM SALA DE AULA

O ensino de ciências, enraizado em aulas expositivas e centrado na figura do professor, está em constante choque com as demandas, comportamentos e artefatos do mundo atual. Isto requer um movimento que faça com que gestores, professores e o sistema educacional se envolvam na busca de novos métodos e instrumentos que possam fazer da escola e da sala de aula um rico local de oportunidades e de aprendizado. Neste cenário, o ensino investigativo se faz uma ferramenta que visa estimular os alunos a pensarem, questionarem e refletirem sobre suas atitudes em sala de aula. Nos últimos dez anos, o cenário educacional vem apontando para um ensino baseado em metodologias ativas, as quais os estudantes são capazes de adquirir habilidades e potencializar a aprendizagem, como podemos observar nos trabalhos de Novak (1999); Turpen e Finkelstein (2010) e também em Araújo e Mazur (2013).

Neste trabalho apresentamos uma proposta de aplicação baseada em uma sequência didática investigativa, com o objetivo de auxiliar os alunos na transposição do conteúdo de ondas. Em certo ponto, considera-se como sequência didática um conjunto de atividades que foram estruturadas para promover a interação entre os alunos e o objeto de estudo, com a finalidade de se cumprir alguns objetivos educacionais (ZABALA, 1998).

A sequência didática investigativa (MOTOKANE, 2015, p. 115-137) apresentada aqui, envolve um diálogo sobre os fenômenos ondulatórios. A sequência é montada com a finalidade de se mapear as concepções prévias dos alunos acerca dos fenômenos físicos que serão explorados. Nesse sentido, a sequência didática investigativa, busca inicialmente apresentar aos alunos organizadores prévios (AUSUBEL, 1968) que podem ser conectados aos conhecimentos prévios dos alunos facilitando o aprendizado de novos conceitos,

Para que ocorra aprendizagem significativa, na perspectiva ausubeliana, são necessários conhecimentos prévios aos quais se relacionarão às novas informações. Estes são os chamados subsunçores e sua capacidade de servir como âncoras do novo conhecimento é, segundo o autor, o fator que mais influencia na aprendizagem. Quando há pouca ou nenhuma interação entre os novos conceitos e os anteriores, a aprendizagem é dita mecânica. (Ferreira, Rocha e Filho, 2019, p. 27-38)

Essa proposta de aplicação está composta por 2 aulas de 50 minutos, divididas em três passos, detalhados abaixo.

No primeiro passo, aplica-se um questionário para avaliação diagnóstica do conteúdo de ondulatória, que permite identificar os conhecimentos dos estudantes e quanto ainda necessitam aprender para obtenção de um melhor rendimento cognitivo.

Este questionário possui as seguintes perguntas: 1. Em sua concepção, o que é uma onda? 2. Quais tipos de ondas diferentes você conhece? 3. Como você acredita que surge uma onda? 4. Você já ouviu falar em movimento oscilatório ou movimento periódico? Se sim, tente explicar o que é e cite exemplo(s). 5. O que é frequência na sua concepção? 6. Você já ouviu falar em ondas estacionárias? Se sim, tente explicar o que significa com suas palavras.

No segundo passo, entrega-se o instrumento Levitador Sônico. Este instrumento é colocado à disposição dos alunos para que os mesmos possam investigar o seu funcionamento, sem a interferência do professor.

Após um pequeno período de investigação, inicia-se o terceiro passo. Lança-se um questionamento cognitivo sobre o fenômeno observado no experimento. O estudante deve compreender o seu funcionamento e desenvolver uma resposta argumentativa à seguinte pergunta: Com esse equipamento é possível estudar ondas de pressão no ar? Os transdutores usados no aparelho emitem uma onda com frequência bem definida, com valor de aproximadamente de 40kHz. Usando seus conhecimentos prévios, elabore um roteiro de experimento, com todos os passos a serem executados e descritos com detalhes, de tal forma que seja possível aferir a velocidade de propagação da onda sonora (no caso ultrassom) no ar.

Também foi criada uma sequência de perguntas. Como direcionamento solicita-se que os alunos respondam:

a) Quais os fenômenos físicos presentes no experimento realizado? b) Quais grandezas físicas você consegue medir neste experimento? c) Relacione os fenômenos observados com as grandezas medidas.

Assim, já se busca problematizar a importância da rigorosidade no registro de informações.

Ressaltamos que o efeito de levitação não deve ser entendido a partir de harmônicos em tubos sonoros abertos. Como explicado anteriormente, trata-se de um efeito de ordens superiores. Contudo, a equação 5 é idêntica àquela do primeiro harmônico em um tubo sonoro aberto, que permite obter a velocidade do som no ar a partir da distância entre duas esferas consecutivas suspensas.

O processo de investigação é ao mesmo tempo método e objeto, pois inevitavelmente se torna parte do assunto que se entrelaça. Desta forma, a linguagem, que é expressão do raciocínio e da inteligência, se desenvolve e juntamente com ela também o convívio em sociedade. Para Silva Filho e Ferreira (2018, p. 112), o caráter investigativo, entretanto, aponta em um sentido que extrapola ao que se pode haurir da abordagem Ausubeliana.

VI. CONCLUSÃO

Planejar uma atividade experimental que seja lúdica, educativa e que esteja inserida em um contexto inovador não é uma tarefa simples. Neste artigo relatamos uma possibilidade de atividade que perpassa por vários problemas relacionados ao desenvolvimento de novas atividades para o Ensino de Ciências: o trabalho colaborativo, a combinatória de elementos científicos com tecnológicos, o desenvolvimento de um produto e a revisão dos pressupostos teóricos e educacionais envolvidos no fenômeno das ondas sonoras estacionárias. Assim pudemos observar vários elementos da Natureza da Ciência (GALILI, 2019, p. 503-537) imersos na construção e desenvolvimento do Levitador. Sobre os resultados, este artigo carrega consigo três pontos de considerável importância: a construção de um levitador acústico de baixo custo, a crítica aos livros didáticos quanto ao descuido em se trabalhar as ondas sonoras estacionárias, e a apresentação e desenvolvimento do modelo matemático que descreve a levitação acústica com base no potencial de L. Gor'kov. Imersos nesse panorama que propõe uma educação desafiadora, voltada para o desenvolvimento de habilidades ligadas à ciência, matemática, inovação e tecnologia. Entendemos que este trabalho pode contribuir para a montagem de uma sequência de trabalho que faça da escola um espaço de inovação, deixando de lado a memorização e reprodução e focando no empreendedorismo intelectual.

VII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro do CNPq, da FAPEMIG, do FNDE. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código do Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, M. A. B.; PÉREZ, N.; ADAMOWSKI, J. C. Review of Progress in Acoustic Levitation. *Brazilian Journal Of Physics*, v. 48, n. 2, p. 190-213, 30 dez. 2018.

ARAÚJO, I. S.; MAZUR, E. Instrução pelos colegas e ensino sob medida: uma proposta para o engajamento dos alunos no processo de ensino-aprendizagem de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 30, n. 2, p. 362-384, 2013.

AUSUBEL, D. P. *Educational Psychology: A Cognitive View*. New York: Holt, Rinehart and Winston. 1968. 685 p.

BRASIL. Ministério da Educação. *Base Nacional Comum Curricular*. Brasília, 2018.

BRASIL, *Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio*. Brasília: MEC/SEMTEC, 2002.

- BRILLOUIN, L. Les pressions et tensions de radiation, *Rev. d'Acoust.*, v. 5, p. 99-111, 1936.
- FERREIRA, M.; ROCHA, J. V. S.; FILHO, O.L.S. Sequência Didática para o Ensino de Acústica. *Physicae Organum*, v. 5, n. 1, p. 27-38, 2019.
- GALILI, I. Towards a Refined Depiction of Nature of Science: Applications to Physics Education. *Science & Education*, v. 28, p. 503537, 2019.
- GOR'KOV, L. P. Forces acting on a small particle in an acoustic field within an ideal fluid, *Doklady Akademii Nauk SSSR*, v. 140, p. 88-91, 1961.
- GYUN et al., High Frequency Ultrasonic Levitation of Red Blood Cells Aggregation, 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2018, pp. 1-3, doi: 10.1109/ULTSYM.2018.8579736.
- JARDIM, W. T.; OTOYA, V. J. V.; OLIVEIRA, C. G. S. A teoria da relatividade restrita e os livros didáticos do Ensino Médio: Discordâncias sobre o conceito de massa. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 37, n. 2, p. 2506-1-2506-7, jun. 2015.
- KING, L. On the Acoustic Radiation Pressure on Spheres, *Proceedings of the Royal Society London A*, v. 147, p. 212-240, nov. 1934.
- MARZO, A.; BARNES, A.; DRINKWATER, B. W. TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator. *Review of Scientific Instruments*, v. 88, n. 8, p. 085105-085110, ago. 2017.
- MOTOKANE, T. M. Sequências Didáticas Investigativas e Argumentação no Ensino de Ecologia. *Revista Ensaio, Belo Horizonte*, v. 17 n. especial, p. 115-137, 2015.
- NOVAK, G. M. et al. Just-in-time teaching: blending active learning with web technology. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999. 188 p.
- RUSSEL, D. A. Acoustics and Vibration Animations. Graduate Program in Acoustics, The Pennsylvania State University, 2012 Disponível em <<https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/StandingWaves/StandingWaves.html>>. Acesso em: 13, setembro, 2019.
- SANTESSON, S.; NILSSON, S. Airborne chemistry: acoustic levitation in chemical analysis. *Analytical And Bioanalytical Chemistry*, v. 378, n. 7, p. 1704-1709, abr. 2004.
- SILVA FILHO, O. L.; FERREIRA, M. Teorias da aprendizagem e da educação como referenciais em práticas de ensino: Ausubel e Lipman. *Revista do Professor de Física*, v. 2, n. 2, 28 ago. 2018.
- TURPEN, C.; FINKELSTEIN, N. D. The construction of different classroom norms during Peer Instruction: Students perceive differences. *Physical Review Special Topics Physics Education Research*, v. 6, n. 2, p. 020123-1 0201231-22, 2010.

VIEIRA, L. P.; AMARA, D. F.; LARA, V.O.M. Ondas sonoras estacionárias em um tubo: análise de problemas e sugestões. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, n. 1, p. 1504-1-1504-5, fev. 2014.

ZABALA, A. *A prática educativa*. Porto Alegre: Artmed, 1998.

ZANG, D. et al. Acoustic levitation of liquid drops: dynamics, manipulation and phase transitions. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 243, p. 77-85, 2017.

A. ANEXO

Lista dos Livros didáticos avaliados no Quadro 1	
1	ARTUSO, R.; WRUBLESKI, M. Física . v. 2, São Paulo: Ed. Positivo, 2013.
2	BÔAS, N. V.; DOCA, R. H.; BISCUOLA, G. J. Física 2 . São Paulo: Saraiva, 2017.
3	BONJORNO, J. R. et al., Física . v. 2, São Paulo: FTD, 2016.
4	FILHO, A. G.; TOSCANO, A. Física, Interação e Tecnologia . v. 2, Rio de Janeiro: Leya, 2013.
5	MARTINI, G. et al. Conexões com a Física . v. 2, São Paulo: Moderna, 2013.
6	MÁXIMO, B. A.; GUIMARÃES, C. Física: Contexto & Aplicações . v. 2, São Paulo: Scipione, 2017.
7	PIETROCOLA, A.; POGIBIN, R.; ANDRADE, T. R. R. Física em Contextos . v. 2, São Paulo: FTD, 2016. 1a ed., v. 2
8	KANTOR, C. A. et al. Quanta Física . v. 2, São Paulo: Pearson, 2013.
9	STEFANOVITS, A. Ser Protagonista . v. 2, São Paulo: Edições SM, 2013.
10	TORRES, C.M. et al. Física, Ciência e Tecnologia v. 2, São Paulo: Moderna, 2016.

B. ANEXO

O código do Levitador Sônico para o Arduino

```
byte TP = 0b10101010; // Cada Porta recebe o sinal oposto
void setup()
{
  DDRC = 0b11111111; // Defini todas as portas analógicas como saída
  // Inicializar temporizador
  noInterrupts(); // Desativar interrupções
  TCCR1A = 0;
  TCCR1B = 0;
  TCNT1 = 0;
  OCR1A = 200; // Cálculo (16MHz / 200 = 80kHz -> 40kHz)
  TCCR1B |= (1 << WGM12);
  TCCR1B |= (1 << CS10);
  TIMSK1 |= (1 << OCIE1A); // Comparar interrupção do tempo entre os transdutores
  interrupts(); // Ativar interrupções
}
ISR(TIMER1_COMPA_vect)
{
  PORTC = TP; // envia o valor TP para as saídas
  TP = ~TP; // Inverter TP para o próximo passe
}
void loop(){
}
```