

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA**

Márcio Fernandes Santana da Costa

Título: Levitação Acústica e o Ensino de Ondulatória - Uma abordagem investigativa

Juiz de Fora

2021

Márcio Fernandes Santana da Costa

Título: Levitação Acústica e o Ensino de Ondulatória - Uma abordagem investigativa

Dissertação apresentada ao Polo 24 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora / Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Física na Escola Básica.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Ferreira Rizzuti

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Gonçalves

Juiz de Fora

2021

Fernandes Santana da Costa, Márcio.

Levitação Acústica e o Ensino de Ondulatória - Uma abordagem investigativa / Márcio Fernandes Santana da Costa. -- 2020.

93 f.

Orientador: Bruno Ferreira Rizzuti

Coorientador: Bruno Gonçalves

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Física, 2020.

1. Ondulatória. 2. Levitação Acústica. 3. Ensino por investigação.
I. Ferreira Rizzuti, Bruno, orient. II. Gonçalves, Bruno, coorient. III. Título.

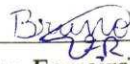
Márcio Fernandes Santana da Costa

Título: Levitação Acústica e o Ensino de Ondulatória - Uma abordagem investigativa

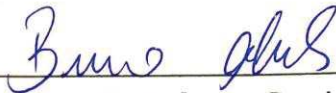
Dissertação apresentada ao Polo 24 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora / Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Física na Escola Básica.

Aprovada em 31 de agosto de 2021.

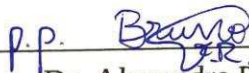
BANCA EXAMINADORA



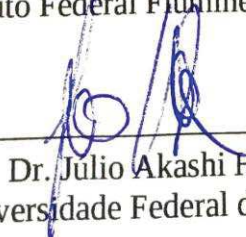
Dr. Bruno Ferreira Rizzuti - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora



Dr. Bruno Gonçalves – Coorientador
Instituto Federal Sudeste de MG – Juiz de Fora



Dr. Alexandre Peixoto do Carmo
Instituto Federal Fluminense – Cabo Frio



Dr. Julio Akashi Hernandez
Universidade Federal de Juiz de Fora

Pelo carinho, afeto, dedicação e cuidado que meus pais, Iza Maria, Darcy e Ivanilde, me deram durante toda a minha existência, dedico esta dissertação a eles. Com muita gratidão.

Às minhas irmãs Mailza e Fabiana, por sua preocupação, carinho e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por me permitir realizar tantos sonhos nesta vida. Permitiu-me errar, aprender, crescer, compreender e perdoar. Deus que transmite seu amor sem limites, de forma "invisível" e que, acima de tudo, não me abandonou, obrigado. Obrigado também por me conduzir a uma família especial. Ainda não entendo o que fiz para merecer tanto. Obrigado.

Para os professores Bruno Gonçalves, Bruno Rizzuti, Iolanda Gonçalves, Marlon de Alcântara e Paulo Menezes, seus valiosos conselhos, sua habilidade, seu profissionalismo e sua dedicação. Mesmo que não tenhamos nos encontrado muitas vezes devido à pandemia e várias vezes me senti decepcionado, porém sempre suas palavras de incentivo foram suficientes para reativar minha animação. Também agradeço à professora Elena Konstatinova, pelas cartas de recomendação e conversas de incentivo. Obrigado por acreditar em mim e por todos os elogios e incentivos. Tenho certeza de que não teria chegado a este ponto sem o apoio de cada um de vocês. Vocês não são apenas instrutores. Para mim, vocês sempre serão um(a) professor(a) e um(a) amigo(a).

Membros da banca examinadora, agradeço todas as ponderações e por gentilmente concordar em participar e cooperar com este tratado.

À minha família, agradeço por apoiarem e compreenderem o meu isolamento.

Aos amigos Sérgio França e Mônica Lopim agradeço o companheirismo, questionamentos e discussões sempre tão produtivas.

Ao amigo Roulien Grijó, agradeço principalmente pela preocupação e apoio constantes, principalmente nos meus piores momentos. Esta conquista se tornou realidade devido ao seu apoio. Aos demais amigos e amigas, obrigado pelo convívio, amizade e apoio demonstrado.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma forma alternativa de se abordar o conteúdo de ondas estacionárias de pressão, através de uma abordagem experimental. 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. Defendemos métodos de como construir um Levitador Sônico de baixo custo com o microcontrolador Arduino para motivar o tema de ondulatória para os alunos. Depois que os alunos observam os pontos de baixa e alta pressão no aparato tecnológico, fica mais natural para o professor tratar o modelo matemático que consegue explicar porque eles conseguem equilibrar os corpos de prova em posições bem específicas no ar. Para facilitar a explicação, geramos uma figura que ajuda a visualizar a distribuição da densidade das moléculas do ar, para este caso. Foi desenvolvida uma Sequência Didática Investigativa (SEI) e aplicada no Ensino Fundamental, Ensino Médio e Ensino Superior, através do método investigativo para o fenômeno experimentalmente abordado. A validade é demonstrada pelas respostas dos alunos à atividade desenvolvida pela SEI. Os resultados obtidos mostram que os alunos entendem o funcionamento e conseguem construir conhecimentos sobre o tema. Além disso, as críticas e sugestões recolhidas no processo mostram que eles efetivamente engajaram-se no processo.

Palavras-chave: Ondulatória; Levitação Acústica; Ensino por investigação.

ABSTRACT

This work presents an alternative way to approach the content of standing pressure waves, through an experimental approach. Traditional textbooks show pictures that can make students create conceptions that do not match those that agree with the mathematical description of the presented phenomenon. We advocate methods of how to build a low cost Sonic Levitator with the Arduino microcontroller to motivate the undulatory theme to the audience. After students observe the low and high pressure points in the technological apparatus, it becomes more natural for the teacher to deal with the mathematical model that can explain why they can balance the test bodies in very specific positions in the air. To facilitate the explanation, we generate a figure that helps to visualize the density distribution of the air molecules, for this case. An Investigative Didactic Sequence (SEI) was developed and applied in Elementary School, High School and Higher Education, through the investigative method for the experimentally approached phenomenon. Validity is demonstrated by the responses of students to the activity developed by SEI. The results obtained show that students understand the functioning and are able to build knowledge on the subject. Furthermore, the criticisms and suggestions collected in the process show that they effectively engaged in the process.

Keywords: Undulatory; Acoustic Levitation, Teaching by Investigation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Representação de ondas longitudinais nos livros.....	15
Figura 2	Representação capciosa de uma onda sonora estacionária: oscilação vertical ou horizontal?.....	17
Figura 3	Zonas de compressão e rarefação de uma onda sonora estacionária.....	18
Figura 4	Ondas sonoras na vertical com o deslocamento e pressão no Levitador, mantendo as esferas de isopor flutuando.....	18
Figura 5	Componentes para montagem do Levitador Sônico.....	19
Figura 6	Detalhes do transdutor retirado do sensor ultrassônico.....	21
Figura 7	Detalhes esquemático dos componentes conectados.....	22
Figura 8	Levitador Sônico em funcionamento.....	23
Figura 9	Levitador Sônico com seus acessórios.....	23
Figura 10	Onda mista.....	26
Figura 11	Onda se deslocamento (a) sistema $t=0$ (b) sistema em um instante t	29
Figura 12	Propagação de uma onda sonora.....	32
Figura 13	Variação de um fluido em um tubo.....	32
Figura 14	Representação gráfica de S e p de fluido em um tubo.....	33
Figura 15	Esfera de um campo de radiação acústica.....	36
Figura 16	Esboço das esferas presas no potencial de Gor'Kov.....	39
Figura 17	Tubo sonoro aberto (primeiro harmônico) e a levitação acústica.....	41
Figura 18	Esquema da metodologia investigativa.....	45
Figura 19	Esquema da metodologia POE.....	46
Figura 20	Esquema da metodologia aplicada.....	49
Figura 21	Alunos do Ensino Fundamental realização a avaliação diagnóstica.....	54
Figura 22	Resposta apresenta por um dos alunos.....	58
Figura 23	Aplicação experimental do Ensino Superior.....	66

LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

Tabela 1	Avaliação dos livros didáticos.....	16
Tabela 2	Resultado da avaliação diagnóstica do Ensino Fundamental.....	55
Tabela 3	Resultado da avaliação diagnóstica do Ensino Médio.....	62
Gráfico 1	Resultado gerado pela pergunta cognitiva na aplicação no Ensino Fundamental.....	59
Gráfico 2	Resultado da escala de motivação dos alunos do Ensino Fundamental.....	61
Gráfico 3	Resultado gerado pela pergunta cognitiva na aplicação no Ensino Médio.....	63
Gráfico 4	Resultado gerado pela pergunta cognitiva na aplicação no Ensino Médio.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

esf	esfera
FO	frente de onda
GND	grounding (aterramento)
IF Sudeste MG	Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais
LED	<i>light emitting diode</i> (diodo emissor de luz)
MNPEF	Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física
PCN	Parâmetros Curriculares Nacionais
PD	pressão e densidade do ar
PNLD	Programa Nacional do Livro Didático
PVC	policloreto de vinila
SEI	Sequência de Ensino por Investigação
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora

LISTA DE SÍMBOLOS

kHz	quilohertz
V	volts
mm	milímetro
AC	corrente alternada
DC	corrente contínua
A	ampère
a	amplitude da onda
Ω	ohm
\sim	aproximação
V_{in}	localização no Arduíno Uno
P	pressão
\vec{F}	força
\int	integral simples
\iint	integral de superfície
ρ	densidade
\vec{u}	velocidade
P_1	aproximação de primeira ordem
U	potencial de radiação
R	raio
k	número de onda
P_0	pressão inicial
ρ_0	densidade inicial
u_0	velocidade inicial
λ	comprimento de onda
M	massa
W	peso
g	gravidade
N	newton
m	metro
kg	quilograma
s	segundo
L	comprimento de um ventre

Sumário

1 INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS DO TRABALHO	13
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	14
2 CRÍTICA À ABORDAGEM CLÁSSICA DO CONTEÚDO DE ONDAS SONORAS	15
3 CONSTRUÇÃO E FUNCIONAMENTO DO LEVITADOR SÔNICO	19
4 A FÍSICA DO SOM.....	25
4.1. ONDAS.....	25
4.1.1 A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DAS ONDAS.....	25
4.1.2 CLASSIFICAÇÃO DAS ONDAS	26
4.2. ONDAS MECÂNICAS	28
4.3. ONDAS HARMÔNICAS	30
4.4. ONDAS SONORAS.....	31
4.4.1 VELOCIDADE DO SOM NO AR.....	34
5 A LEVITAÇÃO ACÚSTICA	36
5.1 CONSTRUÇÃO E UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA: LEVITADOR SÔNICO.....	36
5.2 SIMULANDO ONDAS ESTACIONÁRIAS A PARTIR DA LEVITAÇÃO ACÚSTICA	40
6 REFERENCIAL METODOLÓGICO.....	42
6.1 METODOLOGIA INVESTIGATIVA DE ENSINO	42
6.2 METODOLOGIA POE DE ENSINO	46
6.3 RELAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE INVESTIGAÇÃO E POE	48
6.4 DESENVOLVIMENTO DA SEQUÊNCIA DE ENSINO INVESTIGATIVO	50
7 APLICAÇÃO EM SALA DE AULA.....	52
7.1 REFLEXÃO DA APLICAÇÃO DA SEI EM SALA DE AULA	52
7.2.1 APLICAÇÃO NO NONO ANO DO ENSINO FUNDAMENTAL	53
7.2.2 APLICAÇÃO NO ENSINO MÉDIO.....	61
7.2.3 APLICAÇÃO NO ENSINO SUPERIOR	65
8 CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS.....	69
ANEXO A - Livros didáticos	72
ANEXO B - O código fonte do levitador sônico	73
ANEXO C – Avaliação diagnóstica.....	74
ANEXO D – Pergunta cognitiva.....	75
ANEXO E – Avaliação de Motivação	76
ANEXO F – Confecção do produto educacional	77

1 INTRODUÇÃO

A levitação acústica é um fenômeno previsto teoricamente há um certo tempo (KING, 1934; GOR'KOV, 1961; BRILLOUIN, 1936), que utiliza a pressão de radiação acústica para equilibrar a força de gravidade e suspender a matéria no ar. Para King (1934) o cálculo de pressão da radiação acústica na faixa audível é possível com efeitos de primeira ordem (cálculo feito com a estrutura considerada indeformada), sendo que o objeto seja de forma geométrica simples. Nesse modelo, parece ser impossível calcular a pressão de radiação caso a frequência não seja audível.

Devido às suas diversas possibilidades de aplicação, o fenômeno da levitação acústica tem atraído a atenção de cientistas de diversas áreas tais como a biologia, a química analítica, a farmácia e outros campos tecnológicos (FUSHIMI, 2018). A levitação acústica pode ser usada, por exemplo, para evitar contatos ao redor de amostras, contornando o principal problema de miniaturização.

Técnicas de levitação por ultrassom foram desenvolvidas como uma ferramenta promissora para estudar as propriedades de materiais fundidos e a forma de equilíbrio e a estabilidade das gotas líquidas (ZANG et al, 2017, p.77-85). De acordo com Zang et al (2017) os métodos e a manipulação de amostras de líquidos e sólidos por levitação acústica estão em estudo e possuem diversas áreas para pesquisa.

A temperatura e a transferência de massa em gotas levitadas também foram descritas por Santesson (2004, p.1704-1709), assim como as aplicações de cristalização e microgravidade. A pesquisa de Santesson (2004) foca na levitação acústica para o seu uso na química analítica como técnica fundamental para os estudos das propriedades dos materiais sem o contato com superfícies.

Tais técnicas também podem ser usadas para levitar uma agregação de glóbulos vermelhos, representando 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). Com a técnica de Gyun (2018), a levitação acústica consegue manipular objetos através de fluidos. Além disso, ela permite manipular e estudar células específicas sem o contato com a superfície e outras células.

A levitação acústica é um fenômeno extremamente intrigante por desafiar nosso senso comum, uma vez que não há nenhum efeito eletromagnético ou aerodinâmico aparente que possa explicá-la. Por esses motivos, mas não somente, exploramos neste trabalho o caráter

curioso da levitação acústica como ferramenta didática para o ensino de ondulatória. Para tanto, desenvolvemos um equipamento chamado Levitador Sônico, capaz de manter pequenos pedaços de materiais de baixa densidade flutuando em posições estáveis. O manual do produto, com todos os detalhes para a sua reprodução, encontra-se no Anexo “F”. Acreditamos que tal aparato pode ser útil para promover a interação entre os alunos e o conhecimento científico associado às ondas sonoras estacionárias. Também entendemos que a inserção do aluno em um campo inovador de conhecimento pode potencializar seu interesse pelas atividades para aprendizagem de física.

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

1.1. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS DO TRABALHO

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um aparato para a levitação acústica, criando também sequência didática investigativa para o ensino de ondulatória para o Ensino Fundamental, Ensino Médio e Ensino Superior. Através desta investigação é possível entender o processo de formação das ondas e entender o transporte de energia associados à oscilação das ondas estacionárias.

Os objetivos específicos do trabalho consistem em:

- Investigar os conteúdos de ensino de Ciências do Ensino Fundamental, Médio e Superior, avaliando as possibilidades de trabalho;
- Elaborar uma sequência didática investigativa que tenha uma situação-problema que permita desenvolver os conteúdos de ondulatória;
- Aplicar a sequência didática em Ensino Fundamental, Médio e Superior;

- Avaliar o potencial educativo da proposta levando em conta sua contribuição para a compreensão da natureza de forma integral por parte dos aplicadores e alunos;
- Construir conceitos através da investigação, e os alunos possam identificar a diferença entre os tipos de ondas mecânicas.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A dissertação está estruturada da seguinte forma: no próximo capítulo faremos uma crítica à maneira como diversos livros didáticos abordam o tema das ondas sonoras, no qual está presente no capítulo 2. No capítulo 3 daremos os detalhes da construção e do funcionamento do levitador acústico desenvolvido. Posteriormente, no capítulo 4 apresentaremos a abordagem física. Já no capítulo 5 consta a modelagem matemática do Levitador Sônico. Apresentamos então uma metodologia de aplicabilidade no capítulo 6. No capítulo 7 contém a aplicação do produto em sala de aula e, por fim, no capítulo 8 as conclusões.

2 CRÍTICA À ABORDAGEM CLÁSSICA DO CONTEÚDO DE ONDAS SONORAS

No ensino de ciências, a visualização dos fenômenos físicos pode ser uma extraordinária maneira de entender o comportamento do mundo natural, e como o modelo matemático está conectado a esses fenômenos. Nesta seção, discutiremos a conexão da teoria com a representação das ondas sonoras nos livros didáticos brasileiros. Sabe-se que ondas sonoras são ondas longitudinais e que possuem direção de propagação no mesmo eixo de direção de oscilação. Para introduzir esse conteúdo no ensino de ciências, é comum começar com uma breve explicação sobre as características e propriedades das ondas transversais e longitudinais. Para as ondas longitudinais, alguns livros ilustram esse tipo de onda associada à imagem de molas, conforme mostrado na figura 1. 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.

Figura 1 – Representação de ondas longitudinais nos livros



Fonte: BONJORNO, 2016, v 2, p 220.

Nas escolas públicas brasileiras, os livros didáticos são fornecidos pelo governo, através do “Programa Nacional do Livro Didático” (PNLD). Esses livros são continuamente avaliados e são feitas modificações ao longo do programa. Sobre essas modificações, Jardim, Otoy e Oliveira (2015) afirmaram que as avaliações mostravam que em 2009 os livros didáticos de física analisados apresentaram uma taxa de falhas de 73%. No entanto, os mesmos autores indicam que em 2015 esse índice reduziu para 35%. Para Jardim, Otoy e Oliveira é também perceptível que os temas de física moderna estão cada vez mais presentes nos livros didáticos do ensino básico. 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 como principal recurso didático.

Para conectar o Levitador Sônico com o conteúdo de ondas sonoras proposto nos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs) (BRASIL, 2002a) para estudantes do ensino médio, precisamos observar como os livros didáticos brasileiros explicam e representam o conceito de ondas sonoras estacionárias. Os PCNs apresentam orientações sobre os conteúdos a serem trabalhados na sala de aula, a fim de tornar a prática dos educadores uniforme em todo território brasileiro e, até então, serviam de base para organização dos conteúdos disponibilizados nos livros didáticos.

No nosso estudo, foram analisados dez livros didáticos de física (ANEXO A), utilizados nos últimos quatro anos, todos aprovados pelo PNLD; cinco para o triênio de 2015 a 2017 e cinco para o triênio de 2018 a 2020. Observou-se que nove dos dez livros didáticos possuem um capítulo ou unidade específica sobre ondas sonoras. Nesta avaliação, analisamos três parâmetros: 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 de densidade e pressão.

Tabela 1 – Avaliação dos livros didáticos

LIVROS DIDÁTICOS			
(2015-2017)		(2018-2020)	
1	5	1	5
2	(FO) – 5	2	(FO) - 5
	(PD) – 4		(PD) - 5
3	NENHUM	3	NENHUM

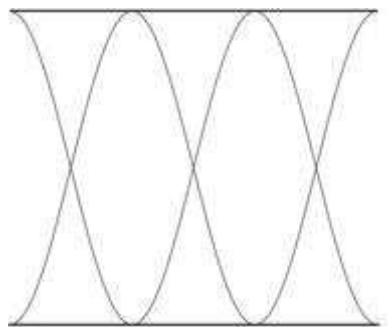
Fonte: Autor (2020).

A partir do 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, os livros didáticos não descrevem nas imagens das ondas sonoras estacionárias as características de densidade e pressão. Essa situação também é observada por Vieira, Amaral e Lara em estudo realizado em 2014 (VIEIRA et al., 2014, p. 1-5). Nesse estudo, os autores criticam e fazem sugestões sobre o conteúdo de ondas sonoras em livros didáticos do ensino médio, principalmente em relação às questões referentes

aos métodos de abordagem utilizados nos livros didáticos, e sugerem alguns recursos para melhorar a performance do livro, como, por exemplo, o tubo de Kundt que é um equipamento metodológico, que possui um tubo de vidro frio que contém ar e material de baixa densidade no seu interior. Em uma extremidade, produz-se ondas estacionárias através de altofalantes. As vibrações são transmitidas para o material de baixa densidade, fazendo o acúmulo deste material em certas regiões do tubo, que geralmente se determina a velocidade de propagação do ar contido no tubo. Sugerimos também o Levitador Sônico, que será descrito nesta dissertação como aparato tecnológico para auxiliar os docentes como um recurso didático que possa ser intrigante e motivador. A partir deste trabalho, publicado em 2013 (CALVANCANTE et al., 2013), pudemos observar que esse cenário não mudou, ou não mudou suficientemente nos livros didáticos.

Detalhes sobre a importância da representação de ondas sonoras estacionárias, focando em densidade e pressão foram discutidos por Russell (2012). Numa viagem de barco, Russell iniciou uma pesquisa investigativa sobre as ondas formadas pelo canal de um rio, e com isso, fundamentou o princípio de superposição de ondas, que significa que o perfil da onda resultante é obtido a partir da soma dos perfis das ondas que se superpõem. Em muitos casos, os livros didáticos brasileiros introduzem ondas sonoras estacionárias após trabalharem as ondas estacionárias em cordas vibrantes, ilustrando principalmente os harmônicos em uma corda de violão. Acreditamos que essa abordagem pode produzir deturpações nas percepções dos alunos, se as ondas sonoras estacionárias mostrarem somente a oscilação horizontal representada por gráficos que parecem apresentar oscilações verticais, como na imagem da Figura 2.

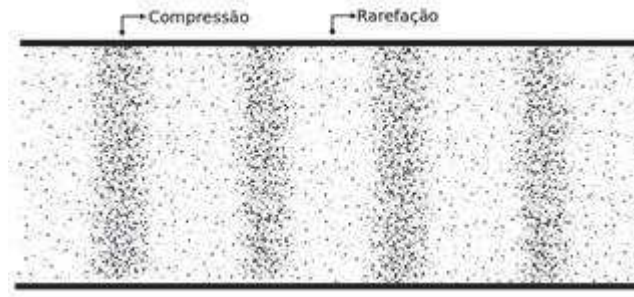
Figura 2 – Representação capciosa de uma onda sonora estacionária: oscilação vertical ou horizontal?



Fonte: Autor (2020).

Nesse caso, entendemos que é importante introduzir um modelo matemático em forma de imagem, que possa representar as compressões e rarefações de densidade e pressão e depois usar a representação comum, como mostrado na Figura 3.

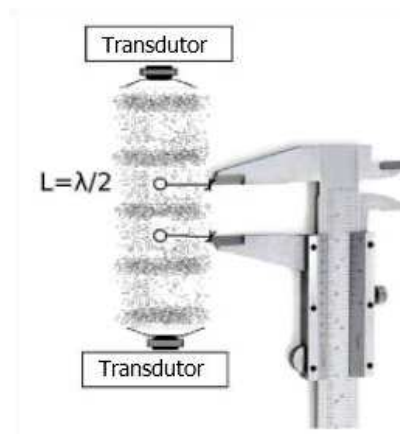
Figura 3 – Zonas de compressão e rarefação em uma onda sonora estacionária



Fonte: Autor (2020).

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, entendemos que o Levitador Sônico, aparado 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 3 e 4.

Figura 4 – Ondas sonoras na vertical como deslocamento e pressão no Levitador, mantendo as esferas de isopor flutuando



Fonte: Autor (2020).

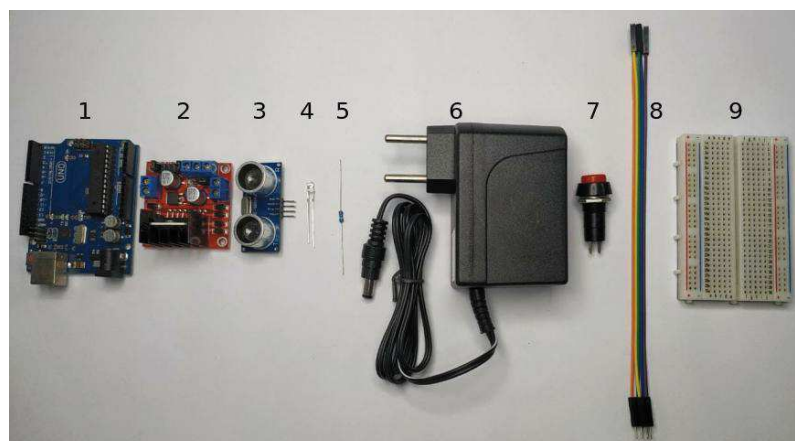
3 CONSTRUÇÃO E FUNCIONAMENTO DO LEVITADOR SÔNICO

Nosso sistema de levitação acústica é formado por dois transdutores de ultrassom, que operam numa frequência de 40 kHz e possuem uma face circular de 16 mm de diâmetro. Os dois transdutores estão na posição vertical com as faces viradas entre si (MARZO, 2017). Sobre esse dispositivo, Marzo (2017), que projetou, avaliou e fabricou um levitador de eixo único com uma frequência de 40 kHz e tensão de 20 V, destaca os pontos importantes: a utilização de poucos componentes e que estes podem ser facilmente encontrados na internet para ser reproduzido. Para a construção do Levitador Sônico foi estimado um valor monetário aproximado de R\$ 130, 00. A título de comparação existe um aparato que se pode conferir no site

<[https://pt.aliexpress.com/item/1005001908749344.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.511f4d29t74mRb&algo_pvid=ad7f8f3d-a1f8-4e76-89f2-3651bb239585&algo_exp_id=ad7f8f3d-a1f8-4e76-89f2-3651bb239585-0&pdp_ext_f=%7B%7Dsku_id"%3A"12000018085453494"%7D](https://pt.aliexpress.com/item/1005001908749344.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.511f4d29t74mRb&algo_pvid=ad7f8f3d-a1f8-4e76-89f2-3651bb239585&algo_exp_id=ad7f8f3d-a1f8-4e76-89f2-3651bb239585-0&pdp_ext_f=%7B%7Dsku_id)> (disponível em 06/09/2021) com o valor de aproximadamente R\$ 425, 77, sem a taxa de R\$ 73, 27 de envio, e o produto vem todo desmontado. Neste sentido, julgamos o Levitador Sônico um aparato de baixo custo.

A distância entre os transdutores é de aproximadamente de 14,7 mm. 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 5 – Componentes para montagem do Levitador Sônico



Fonte: Autor (2020).

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. Uma fonte 12 volts (especificações: marca UNITEL, entrada: 100-240 volts AC, saída: 12V DC, corrente: 1A);
6. Um *switch button* (especificações: marca Daie; modelo PBS 11A; tensão 12V; corrente máxima na chave 3A/250V);
7. Um resistor de 220 Ω ;
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, retiramos a peça do circuito impresso. Para identificar qual dos sensores é o transdutor, procura-se visualizar o que tem a letra “T” escrito 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 6.

Figura 6 – Detalhes do transdutor retirado do sensor ultrassônico



Fonte: Autor (2020).

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 botton* 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 6~35V o pino positivo, e no pino GND o negativo da protoboard.

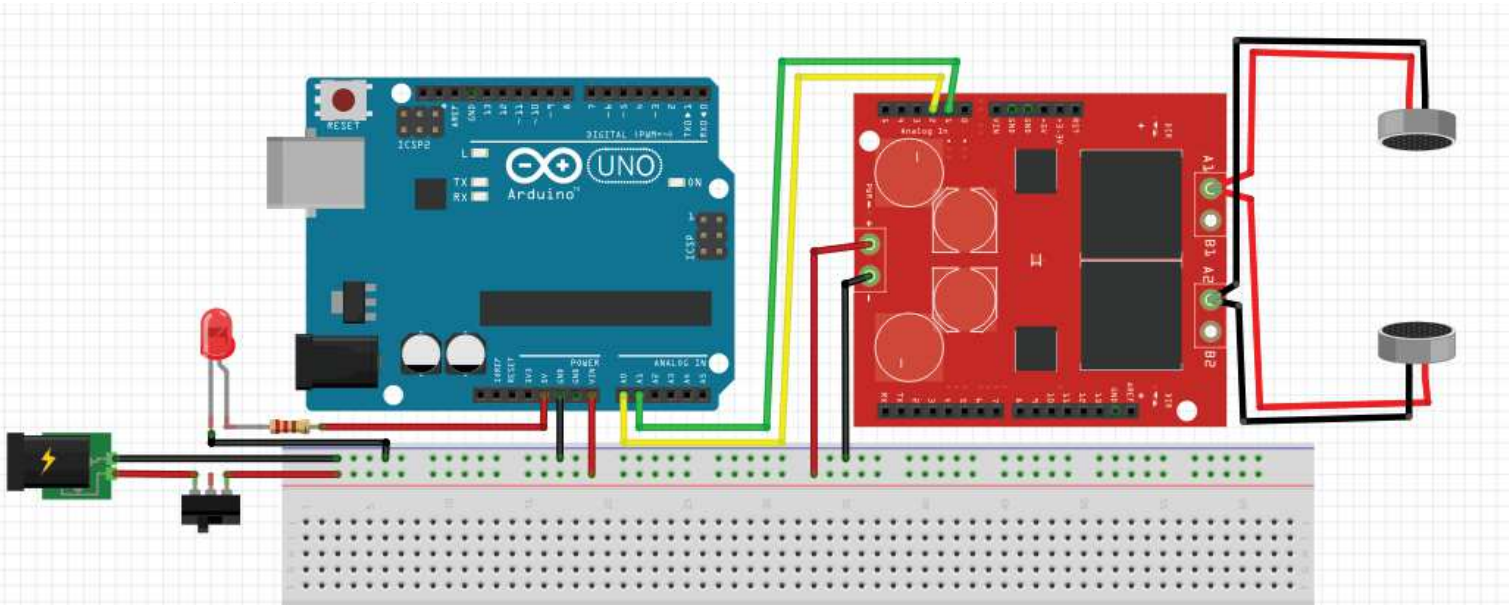
d) A porta IN1(IN2) do driver motor é conectada à porta A2(A1) do Arduino.

e) Solda-se um resistor 220Ω na perna mais comprida 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 V_{in} e o negativo no GND.

Os componentes e o esquema de montagem descritos acima podem ser vistos na Figura 7, representando o protótipo do produto.

Figura 7 – Detalhes esquemático dos componentes conectados



Fonte: Autor (2020).

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 de polímero PVC. Sua altura pode ser ajustada por uma borboleta. Os detalhes estão na Figura 8.

Seguimos ainda os seguintes passos para a montagem final do Levitador:

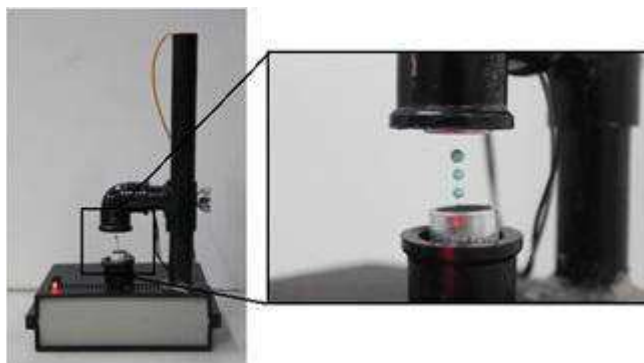
a) Sugere-se armazenar as pequenas esferas de isopor em um recipiente para evitar que elas se espalhem durante a utilização do produto.

b) Construimos uma mini escumadeira ou espumadeira (especificações: 103,00 mm de comprimento, 5,25 mm de diâmetro de base, 14,00 mm de diâmetro de concha) que é utilizada para colocar as pequenas esferas de isopor levitando entre os dois transdutores.

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

A Figura 8 mostra o aparato em funcionamento, com pequenas esferas de isopor levitando.

Figura 8 – Levitador Sônico em funcionamento



Fonte: Autor (2020).

Os detalhes do cabo de verificação e da espuma de madeira depositando uma esfera estão destacadas na Figura 9.

Figura 9 – Levitador Sônico com seus acessórios



Fonte: Autor (2020).

A experimentação realizada em sala não é frequentemente adotada pela maioria dos professores, ao contrário disso, uma minoria realiza atividades experimentais com seus alunos. Mesmo que os professores estejam cientes da importância da atividade experimental na educação científica, poucos a utilizam em sala de aula, seja pela falta de tempo, seja pela ausência de equipamentos e laboratórios. Acreditamos que esse cenário pode mudar, como proposto nesta dissertação. Com isso, consideramos o Levitador Sônico como uma ferramenta tecnológica que pode ser utilizada para análise de diferentes atividades didáticas. No próximo

capítulo será apresentado o conteúdo de física envolvido no fenômeno da levitação sônica, como uma contribuição importante para compreender as etapas envolvidas na construção do conhecimento científico.

4 A FÍSICA DO SOM

Neste capítulo, trataremos das ondas sonoras (longitudinal e mecânica). Entenderemos o som como uma vibração que se propaga no ar e em outros meios formando regiões de compressão e rarefação, ou seja, regiões de altas e baixas pressões.

4.1. ONDAS

Ondas são vibrações que se propagam no tempo e no espaço transportando energia com uma velocidade bem definida, sem a necessidade de transportar matéria. Com isso, adotamos que as ondas mecânicas possuem movimentos vibratórios, periódicos ou não, deslocando-se em um meio elástico. Já as ondas eletromagnéticas surgem da vibração/variação dos campos elétricos e magnéticos e se propagam no vácuo e em alguns meios materiais. No cotidiano observamos diversos tipos de ondas como ondas sonoras, sísmicas e eletromagnéticas.

4.1.1 A importância do estudo das ondas

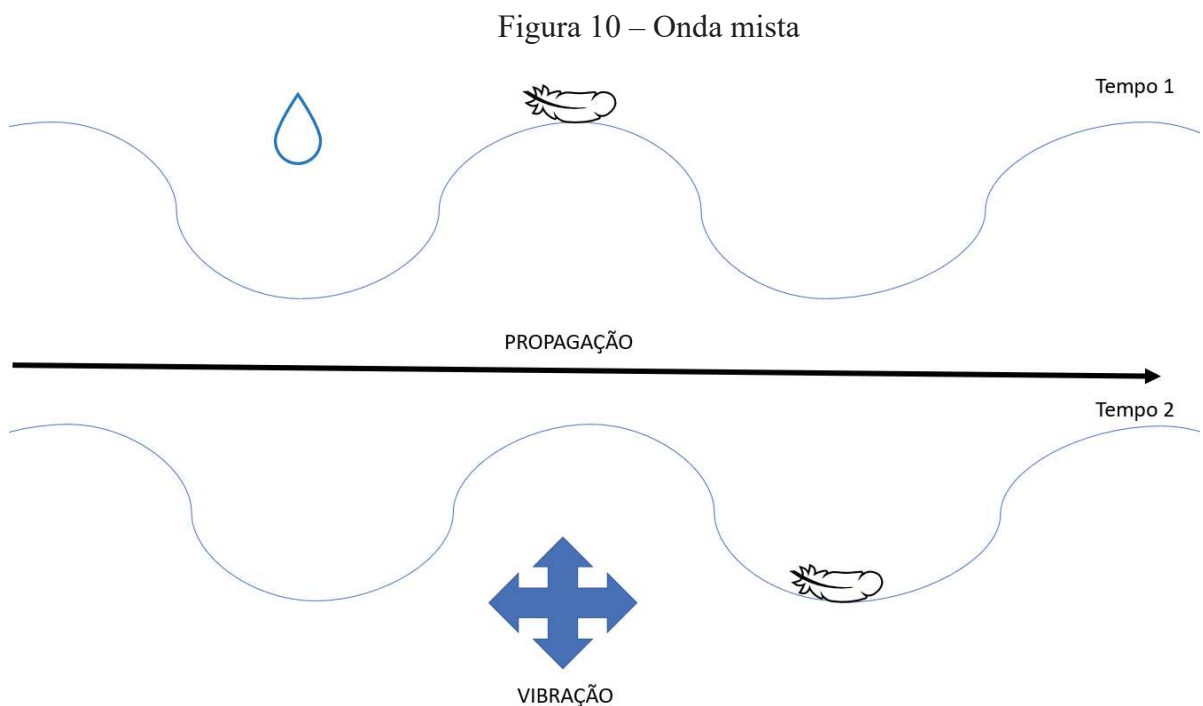
As ondas estabelecem um dos principais campos de estudo da física, o que as tornam fenômenos muito importantes. Para ter uma concepção da importância das ondas na atualidade, tomamos como exemplo o meio musical. Se analisamos um dos eventos ondulatórios mais simples que é o da reflexão, podemos estudar as ondas estacionárias em cordas e tubos e compreender o funcionamento da maioria dos instrumentos musicais. Ouvir uma música, do rock a uma ópera, envolve a geração de ondas sonoras pelos artistas e a captação dessas ondas pelos ouvintes. A reprodução de mídias musicais foi evoluindo de acordo com a tecnologia. Antigamente tínhamos disco de vinil, fitas cassete, CD's, MP3 e agora é possível ter o acesso em nuvem na internet. A música é uma área de entretenimento que possui um grande valor econômico, e a recompensa para os cientistas que desenvolvem novas técnicas pode ser muito generosa.

4.1.2 Classificação das ondas

A classificação das ondas permite dividi-las de acordo com sua natureza, direção de propagação e direção de vibração. De acordo com sua natureza, a onda pode ser classificada em mecânica, eletromagnética, gravitacional e de matéria; de acordo com as direções de propagação, classifica-se uma onda como unidimensional, bidimensional ou tridimensional; e de acordo com a direção de vibração, como longitudinal ou transversal.

Pela direção de vibração iremos conceituar os dois tipos de ondas: as transversais e as longitudinais. Ondas transversais são aquelas em que a direção de propagação é perpendicular ao estímulo responsável pela sua formação, ou seja, onde ocorre a vibração que produz a onda. As ondas longitudinais são aquelas em que a direção de propagação se alinha com a direção das vibrações.

Algumas ondas apresentam comportamentos longitudinais e transversais simultaneamente enquanto se propagam. As ondas na água e as ondas geradas num terremoto são exemplos de ondas com comportamento misto, que pode ser descrito como uma combinação entre os dois modos (HALLIDAY e RESNICK, 2009), como na figura 10.



Fonte: Autor (2020).

Um movimento ondulatório se identifica com o transporte de energia e o momento entre dois pontos do espaço, não havendo o transporte de matéria. A partir desse conceito conclui-se que as ondas podem ser:

Mecânicas: quando a energia e o momento são transportados através de perturbações do ambiente onde ocorre a sua propagação, que não seja o vácuo, ou seja, precisam de um meio físico para se propagarem (HALLIDAY e RESNICK, 2009). São produzidas por estímulos mecânicos, como colisões entre corpos envoltos em qualquer meio, como ar, água, metais etc. Desse modo ressaltamos que as ondas mecânicas são vibrações capazes de se propagarem em meios elásticos (que dissipam pouca energia), como o som e todas as demais formas de vibrações.

Eletromagnéticas: neste tipo de onda a energia e o momento são conduzidos por variações dos campos elétricos e magnéticos e não necessitam de um meio material para se propagar, podendo ser transportados através do vácuo (HALLIDAY e RESNICK, 2009).

Gravitacionais: são ondas de gravidade, que podem ser observadas quando dois ou mais corpos extremamente massivos colidem-se. A Revista Brasileira de Ensino de Física vem publicando regularmente sobre o tema, com artigos didáticos e acessíveis, que podem ser obtidas pelo link: <http://www.sbfisica.org.br/v1/home/index.php/pt/destaque-em-fisica/135-entenda-a-importancia-das-ondas-gravitacionais-com-a-rbef>. Apesar de terem sido previstas há muito tempo, depois de anos produzindo resultados nulos, o LIGO (em inglês: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) fez a primeira detecção direta de ondas gravitacionais em 14 de setembro de 2015, trabalho este que resultou no prêmio Nobel de Física de 2017, os laureando o alemão Rainer Weiss e os norte-americanos Barry C. Barish e Kip S. Thorne. Essas ondas não necessitam de um meio para se propagar e propagam-se com a velocidade da luz no vácuo.

Ondas de matéria ou onda de De Broglie: qualquer partícula deslocando-se tem associado a ela um comprimento de onda. As relações de De Broglie mostram que tal comprimento de onda é inversamente proporcional ao momento linear da partícula e que a frequência é diretamente proporcional à energia cinética da partícula. O comprimento de onda de matéria é também chamado comprimento de onda de De Broglie.

As ondas também podem ser classificadas quanto às suas direções de propagação como: unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais.

As ondas unidimensionais são aquelas que se propagam em uma única direção. Como exemplo podemos citar uma onda transversais que se propaga em uma corda, ou seja,

que varia somente em um eixo. A equação (1) descreve as perturbações ξ em função do espaço e do tempo neste tipo de onda (NUSSENZVEIG, 2014)

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}, \text{ onde } \xi = \xi(x, t). \quad (1)$$

Utilizamos “u” para representar velocidade de propagação da onda, t para tempo e x para deslocamento no eixo x.

As ondas bidimensionais são aquelas que se propagam em um plano, ou seja, qualquer direção de propagação pode ser descrita através de duas direções principais. Para este tipo de onda temos como exemplo as ondas na superfície da água, bem como as ondas estacionárias formadas nas membranas de um instrumento de percussão. A equação 2 descreve as perturbações ξ em função do espaço e do tempo para este tipo de onda.

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}, \text{ onde } \xi = \xi(x, y, t). \quad (2)$$

Ondas tridimensionais são aquelas que se propagam no espaço, ou seja, sua direção de propagação pode ser descrita através de três dimensões principais. As ondas sonoras e as ondas eletromagnéticas são exemplos deste tipo de ondas. A equação (3) descreve as perturbações ξ em função do espaço e do tempo para este tipo de onda.

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}, \text{ onde } \xi = \xi(x, y, z, t). \quad (3)$$

O lado esquerdo da equação pode ser substituído pelo laplaciano $\nabla^2 \xi(x, y, z, t)$ ficando:

$$\nabla^2 \xi(x, y, z, t) = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}. \quad (4)$$

4.2. ONDAS MECÂNICAS

Objeto de estudo das atividades experimentais desta dissertação são as ondas mecânicas, ou seja, aquelas que necessitam de um meio material para se propagar e este meio deve apresentar propriedades elásticas, responsáveis pela energia potencial do sistema e propriedades inerciais, responsáveis pela energia cinética do sistema.

Para Nussenzveig (2002), a onda mais simples de se caracterizar é a onda progressiva em uma única dimensão (onda plana), cujo movimento só depende das variáveis x e t.

Na figura 11(a) podemos ver uma onda progressiva que se desloca para a direita com velocidade V no instante $t = 0$ e dois sistemas referenciais coincidentes O e O' neste

instante. Na figura 11(b) temos o perfil desta onda num instante $t > 0$ e um referencial inercial $O'x'y'$ que se desloca com a mesma velocidade u da onda.

Figura 11 – Onda se deslocando (a) sistema em $t=0$ (b) sistema em um instante t .



Fonte: Nussenzveig H. M., 2014, - Curso de Física Básica, V.4, p.99, e modificada pelo autor 2021.

Considerando que o perfil da onda não sofre alteração com o tempo, no referencial $O'x'y'$, que se desloca com velocidade u para a direita, tendo o eixo x' coincidindo com o eixo x em todos os instantes, podemos escrever:

$$y'(x', t) = y'(x', 0) = y'(x'). \quad (5)$$

Verificamos então que y' é função somente de x' . Pelas transformações de Galileu a relação entre os dois referenciais é dada por (ROCHA et al, 2013):

$$x = x' + ut \text{ e } y = y'. \quad (6)$$

Assim, podemos escrever a função de onda para o referencial Oxy por:

$$y(x, t) = f(x - ut), \text{ onda movendo para a direita,} \quad (7)$$

$$y(x, t) = f(x + ut), \text{ onda movendo para a esquerda.} \quad (8)$$

Para o caso de uma onda unidimensional se propagando transversalmente numa corda podemos através da equação (7), obter a equação de movimento desta onda:

$$y(x, t) = f(x') \text{ que } x' = x - ut. \quad (9)$$

A velocidade de um ponto x que se desloca verticalmente na direção de y num instante t , como mostra a figura 5 (b), é dada por $\frac{\partial}{\partial t} y(x, t)$ e sua aceleração por $\frac{\partial^2}{\partial t^2} y(x, t)$.

Tomando as derivadas parciais $\frac{\partial}{\partial t} y(x, t)$ e $\frac{\partial}{\partial x} y(x, t)$ temos:

$$\frac{\partial}{\partial t} y(x, t) = \frac{dy}{dx'} \frac{\partial}{\partial t} (x - ut) = (-u) \frac{dy}{dx'}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} y(x, t) = \frac{dy}{dx'} \frac{\partial}{\partial x} (x - ut) = \frac{dy}{dx'}. \quad (11)$$

Tomando as derivadas segundas $\frac{\partial^2}{\partial t^2} y(x, t)$ e $\frac{\partial^2}{\partial x^2} y(x, t)$ temos:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} y(x, t) = u^2 \frac{d^2 y}{dx'^2}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} y(x, t) = 1 \frac{d^2 y}{dx'^2}. \quad (13)$$

Comparando a equação (12) com a (13), temos:

$$\frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0. \quad (14)$$

A equação (14) representa a equação de onda unidimensional. Esta equação de derivadas parciais de segunda ordem é uma equação linear. Se tivermos $y_1(x, t)$ e $y_2(x, t)$ como soluções da equação (14), a combinação linear dada por:

$$y_3(x, t) = C_1 y_1(x, t) + C_2 y_2(x, t) \quad (15)$$

também será solução desta equação, em que C_1 e C_2 são constantes arbitrárias. Este resultado, revela uma forma de se compreender o princípio da superposição de ondas em uma corda ou mesmo da superposição de ondas sonoras presente no Levitador Sônico.

4.3. ONDAS HARMÔNICAS

Uma onda harmônica é aquela em que a fonte que a produz gera perturbações que são movimentos harmônicos simples. Apenas como exemplo, podemos citar a onda sonora produzida por um diapasão ou a onda produzida em uma corda presa a um sistema massa-mola oscilando em torno de uma posição de equilíbrio.

Uma onda harmônica pode ser representada por uma função seno ou cosseno que representa a solução da equação de onda.

Na figura 11, apresentamos uma onda harmônica senoidal produzida numa corda longa. Como a onda se propaga na figura com uma velocidade u para a posição positiva do eixo x , num intervalo de tempo Δt ela desloca Δx .

A equação pode ser descrita pela função seno por:

$$y(x, t) = a \text{sen}(kx - \omega t + \delta). \quad (16)$$

Descrevendo esta onda, podemos verificar que os deslocamentos das partículas da corda ficam confinados entre os valores $y = \pm a$; onde a é a amplitude da onda. O período desta onda, representado por T , é definido como o tempo para a onda percorrer um comprimento de onda. Outras relações importantes são:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{\lambda}{u}, \quad (17)$$

onde $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular, sendo f a frequência das oscilações.

4.4. ONDAS SONORAS

Se tivermos uma fonte de ondas que oscile no ar ou na água, ou num meio homogêneo qualquer, estas oscilações, de acordo com Gaspar (2010, p. 50), “dão origem a ondas mecânicas tridimensionais longitudinais que tendem a se propagar uniformemente em todas as direções por meio de frentes de ondas esféricas”.

Pelo fato de essas ondas necessitarem de um meio material para sua propagação, são chamadas de ondas mecânicas e, portanto, não se propagam no vácuo. No cotidiano, limitamos a dar maior importância àquelas ondas harmônicas longitudinais que se propagam no ar com frequências na faixa de 20 Hz até 20 kHz e que, ao atingirem o ouvido, serão interpretadas pelo cérebro como som.

Em geral, as ondas possuem velocidade de propagação dependente das propriedades elásticas e inerciais do meio em que ocorre sua transmissão. Para o som, sua velocidade pode ser expressa por:

$$u = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}}, \quad (18)$$

onde B é o módulo de elasticidade volumar e, ρ_0 é a densidade volumétrica do meio.

Considerando o ar como meio de propagação do som, suas moléculas vibram para frente e para trás na mesma direção em que a onda se propaga. Sempre que essas moléculas sofrem um deslocamento, ocorre um aumento ou uma diminuição da densidade e conseqüentemente uma compressão ou rarefação do ar. Esta variação na densidade originada pelo deslocamento de um elemento de ar provoca então uma mudança de pressão que, por sua vez, causa um deslocamento do ar adjacente e o ciclo recomeça, proporcionando desta forma, a transmissão de energia sonora através do ar.

Nussenzveig (2002) destaca qualitativamente este processo de propagação das ondas sonoras através de um ciclo que pode ser observado na figura 12.

Figura 12 – Propagação de uma onda sonora.



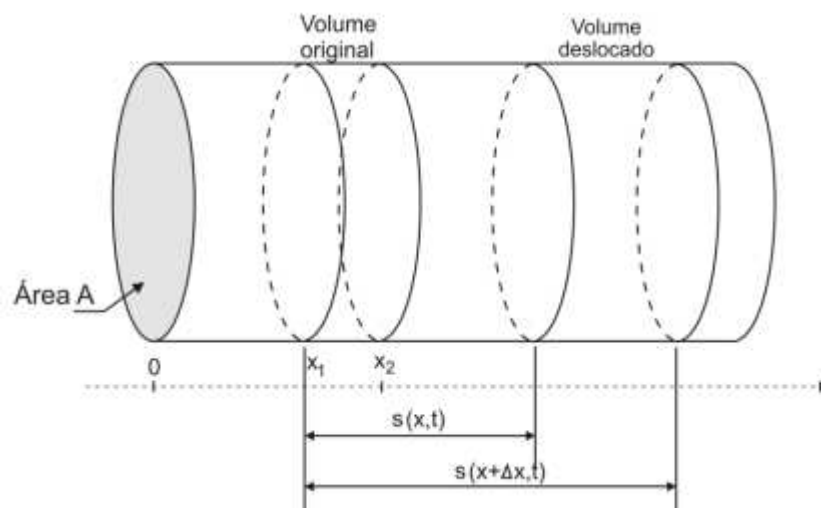
Fonte: Nussenzveig, H.M.,2014. - Curso de Física Básica - V.2p. 123.

Os deslocamentos das partículas de ar numa onda sonora harmônica se deslocando para a direita num tubo cilíndrico, como mostra a figura 13, podem ser descritos na equação (19), que é solução da equação de onda,

$$S(x, t) = S_0 \text{sen}(kx - \omega t + \delta), \quad (19)$$

onde S é a amplitude dos deslocamentos das partículas; k é o número de onda e a constante de fase.

Figura 13 – Variação de um fluido em um tubo.



Fonte: Nussenzveig, H.M, 2014. - Curso de Física Básica.V4, p125.

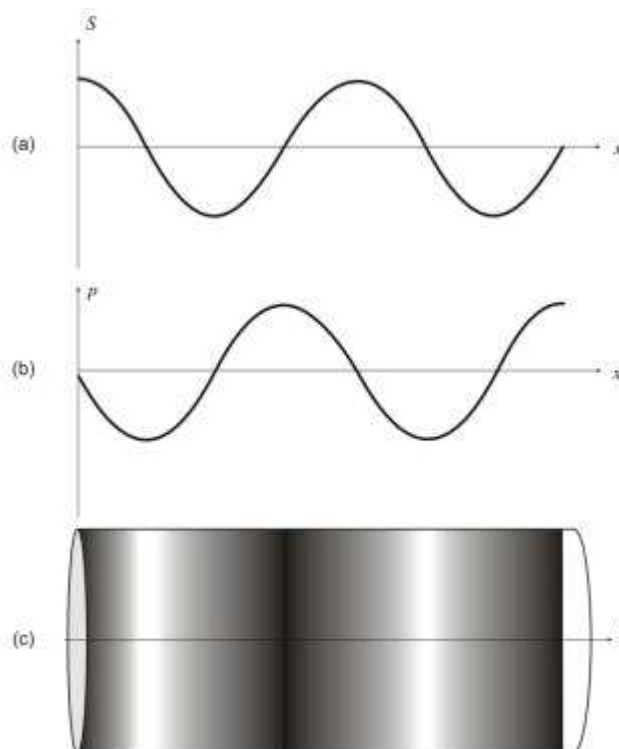
Associada a esta equação de deslocamento $S(x,t)$, temos uma correspondente equação que representa a onda de pressão $p(x,t)$, que descreve as variações de pressão em relação à pressão de equilíbrio do gás no cilindro e é dada por:

$$p(x,t) = \rho_0 u^2 k S \cos(kx - \omega t), \quad (20)$$

onde ρ_0 é a densidade do gás.

Analisando a equação (19) e a equação (20) podemos ver que se diferem pela função *seno* e *coseno* do argumento $(kx - \omega t)$. Se considerarmos $\delta = 0$ na onda de deslocamento, temos que esta onda está defasada em 90° da onda de pressão, como se pode ver na figura 14 (a) e (b). Em (c) mostramos uma representação artística em que podemos verificar o comportamento da densidade do ar num determinado instante.

Figura 14 – Representação gráfica de S e p de fluido em um tubo.



Fonte: Tipler, P.A., 2009 - Física - V.1b p. 399.

As Variações de S e p de um fluido em um tubo, na figura 14 “a” e “b”, geralmente tentamos fazer uma representação de uma onda que se desloca em um fluido no eixo x . Porém o movimento longitudinal somente requer que cada partícula empurre os seus vizinhos, o que pode acontecer também em líquidos ou gases. Então a figura 14

(c) é um modelo de como devem ser representadas as figuras de ondas longitudinais nos livros.

4.4.1 Velocidade do som no ar

A velocidade do som no ar é dada pela equação (18), em que o módulo de elasticidade volumar isotérmico é dado por:

$$B_{\text{isotérmico}} = \frac{-dP}{\frac{du}{u}} = P. \quad (21)$$

Se considerarmos uma massa de gás, para que o processo de propagação das ondas sonoras seja isotérmico, o mesmo deve trocar calor com o ambiente externo. Newton calculou a velocidade do som no ar utilizando o processo de compressão ou expansão do ar como isotérmico, e obteve:

$$v = \sqrt{\frac{B_{\text{isotérmico}}}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{P}{\rho_0}}. \quad (22)$$

Considerando a pressão de 1 atm $\approx 1,013 \times 10^5$ N/m² e a densidade do ar $\rho_0 = 1,293$ kg/m³ a 0 °C, obtém-se:

$$v = \sqrt{\frac{1,013 \times 10^5}{1,293}} \approx 280 \text{ m/s}. \quad (23)$$

Este resultado encontrado por Newton é 15% menor que a velocidade do som a 0 °C que é de aproximadamente 332 m/s. Newton fez uma série de ajustes para explicar essa diferença entre os resultados teórico e experimental da época, mas foi somente com Laplace, mais de um século depois, no ano de 1816, que se explicou que as compressões e rarefações do ar não podiam ser processos isotérmicos, mas sim adiabáticos, ou seja, sem troca de calor com o meio exterior. Estas compressões aconteciam de forma muito rápida, não permitindo que houvesse tempo para trocas de calor durante o processo. Na termodinâmica, o módulo de elasticidade volumar é escrito pela equação:

$$B_{\text{adiabático}} = \frac{-dP}{\frac{dV}{V}} = \gamma P. \quad (24)$$

Onde γ é uma constante definida como a razão entre os calores específicos molares para o gás à pressão e volumes constantes

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}. \quad (25)$$

Esta constante depende da natureza do gás. Relacionando a velocidade do som com o módulo de elasticidade volumar adiabático, a equação 22 reduz-se a:

$$v = \sqrt{\frac{B_{adiabático}}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho_0}}. \quad (26)$$

Para o ar, a constante tem o valor de 1,4. E para uma temperatura de 0 °C a velocidade do som é:

$$v = \sqrt{\frac{1,4 \times 1,013 \times 10^5}{1,293}} \approx 330 \text{ m/s}. \quad (27)$$

A partir do conteúdo acima, esta dissertação irá descrever no próximo capítulo o fenômeno de levitação acústica. Também explicaremos como foi possível utilizar o Levitador Sônico como experimento educacional, pois sabemos que diferente do Tubo de Kundt, possui emissão de frequências acima da audição humana no qual torna instigante, prazeroso e cativante sua utilização.

5 A LEVITAÇÃO ACÚSTICA

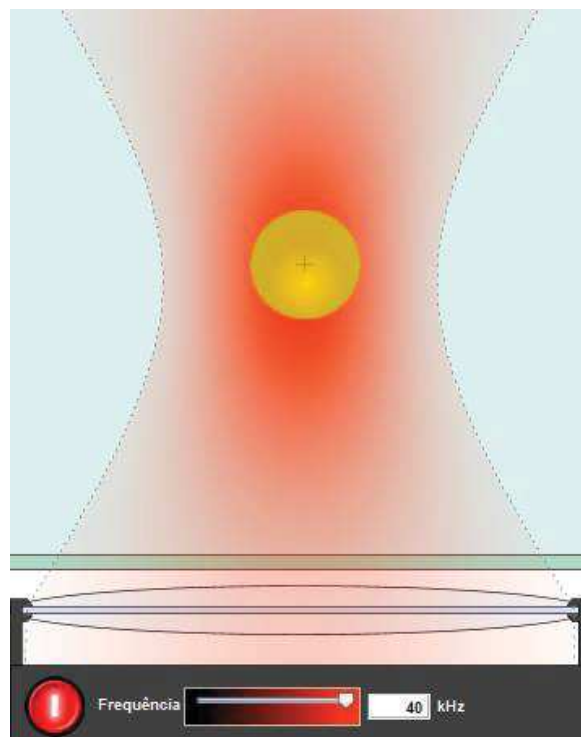
Neste capítulo será apresentado o modelo utilizado para descrever matematicamente a levitação acústica. Ela é determinada pela pressão de radiação acústica sobre as esferas que levitam entre dois transdutores. Em certo limite, podemos utilizar o potencial da força, conhecido como potencial de Gor'Kov (ANDRADE, 2018). Nosso produto, contudo, consegue simular o efeito de superposição de ondas em tubos sonoros abertos, como veremos no fim deste capítulo.

5.1 CONSTRUÇÃO E UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA: LEVITADOR SÔNICO

A descrição matemática precisa da levitação acústica não é uma questão trivial. Em princípio, conforme a figura 15, encontra-se o campo de pressão P na região espacial onde as pequenas esferas levitam e escrevemos imediatamente,

$$\vec{F} = -\iint_{(esfera)} P d\vec{S}. \quad (28)$$

Figura 15 – Esfera em um campo de radiação acústica.



Fonte: print screen do Simulador de PHET interactive simulations (<https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/optical-tweezers>) e modificado, pelo autor, 2021.

$\vec{F} = -\iint_{(esfera)} P \vec{dS}$ expressão (28) fornece a força de radiação acústica sobre a superfície de uma esfera. O problema aqui é como encontrar o campo de pressão de radiação. Discutiremos essa questão qualitativamente. Existem três variáveis usadas para descrever o fluido: a densidade ρ , a velocidade \vec{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).

O conjunto das equações nas etapas (i) - (iii) geralmente é resolvido assumindo pequenas variações dos campos ρ , \vec{u} e P . Nesse caso, com algumas simplificações adicionais, como a esfera ser rígida e o fluido invíscido, isto é, sem viscosidade, a pressão pode satisfazer a equação de onda. A dependência do tempo da solução correspondente é fornecida pelo termo da forma $P_1 \sim \cos \omega t$, em que P_1 representa a aproximação de primeira ordem.

As aplicações padrão de radiação acústica (incluindo o equipamento desenvolvido aqui) usam frequências de 40 kHz. Por outro lado, a escala de tempo em que o efeito observável ocorre é mais lenta do que P_1 . Portanto, é natural avaliar a potência média correspondente

$$\langle P_1 \rangle \sim \int_0^{2\pi/\omega} \cos \omega t dt = 0. \quad (29)$$

Nesse caso, a força média agindo sobre a esfera será zero, e elas estarão apenas sob o efeito da gravidade, contrariando o efeito de levitação. Assim, temos que considerar efeitos de segunda ordem para obter a pressão/força sobre as esferas de isopor. Esse fato foi observado como uma crítica severa que o próprio Lord Rayleigh havia recebido de Brillouin (BRILLOUIN, 1936, p.379), aqui reproduzido:

Lord Rayleigh devotou muitos trabalhos para a pesquisa sobre a pressão de radiação de ondas sonoras, mas seus cálculos não são precisos por vários erros de detalhe; [...] é preciso levar em consideração uma série de efeitos de segunda ordem.

L. Gor'Kov (1961) obteve a expressão da força da radiação acústica atuando sobre uma pequena esfera em um campo arbitrário. Neste caso especial, embora tenhamos uma força de contato atuando na superfície do objeto no fluido, Gor'Kov deduziu um potencial U de modo que as esferas imersas sentiriam uma força dada por $\vec{F} = -\nabla U$. Tanto o potencial quanto a força são dados por

$$U = \frac{P_0^2 \pi R^3}{\rho_0 u_0^2} \left[\frac{\cos^2 kz}{3} - \frac{\sin^2 kz}{2} \right] \Rightarrow \vec{F} = \frac{5\pi R^3 k P_0^2}{6\rho_0 u_0^2} \sin 2kz \hat{k}. \quad (30)$$

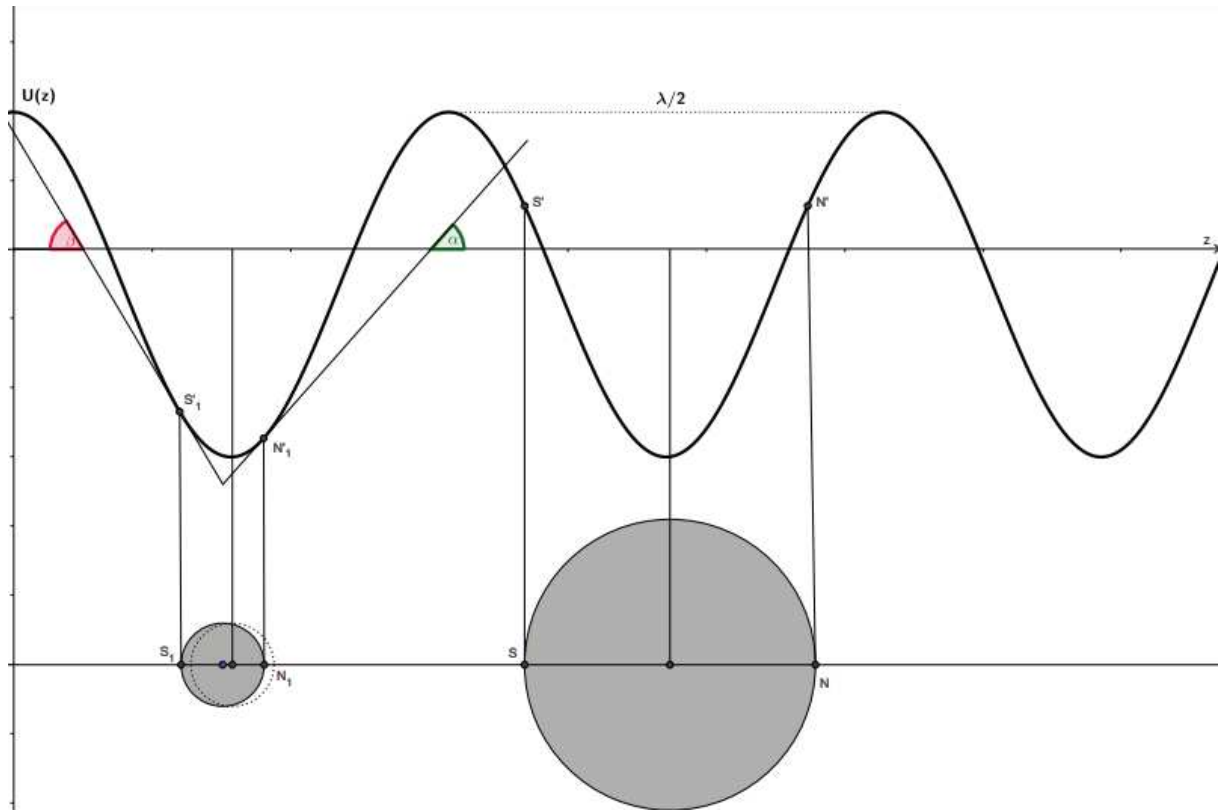
A fórmula é idêntica à expressão encontrada quase 30 anos antes por King (KING, 1934, p.212-240). Neste caso, R é o raio das esferas, k é o número de onda, P_0 , ρ_0 e u_0 correspondem à pressão, densidade e velocidade sem perturbação. O eixo z conecta os dois transdutores em nossa configuração.

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 40000Hz é $\lambda = 8,5\text{mm}$, onde usamos $u_0 = 340,00\text{ m/s}$. 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 podemos ver na Figura 8. Além disso, nossas esferas são feitas de isopor (poliestireno expandido), com densidade de $25,0\text{ kg/m}^3$. 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, usamos $g = 10\text{ m/s}^2$. A força máxima que a expressão (30) fornece é dada por

$$|\vec{F}| = \frac{5\pi R^3 k P_0^2}{6\rho_0 u_0^2} = 0,43\text{N}. \quad (31)$$

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 $k = 2\pi/\lambda$. 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?

Figura 16 – Esboço das esferas presas no potencial de Gor'Kov



Fonte: Autor (2020).

Considere a Figura 16. Traçamos o potencial como uma função de z , e na parte inferior da figura está a bola flutuante. O diagrama de potencial é uma função periódica com diferentes pontos mínimos: a distância mútua pode ser obtida a partir da força e é dada por $\lambda/2$. De fato, para equilibrar o peso devemos ter $2kz_n = n\pi$; $n \in N$. Assim, entre um ponto mínimo e outro, temos,

$$2kL = 2\frac{2\pi}{\lambda}L = 2\pi \Rightarrow L = \frac{\lambda}{2}. \quad (32)$$

Esse fato também pode ser explorado em atividades de ensino, como veremos na próxima seção. Esse ponto é um equilíbrio estável em certo sentido, ou seja, para pequenos deslocamentos de variáveis posicionais, a força sentida pela pequena esfera é sempre restauradora. Por causa de sua separação, o polo norte e o polo sul, denotados por N e S na Figura 16, caem numa posição em que a força restauradora sobre tais pontos, dada por $0,43N \text{sen} \left[2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) R \right] \approx 0,37N$, 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

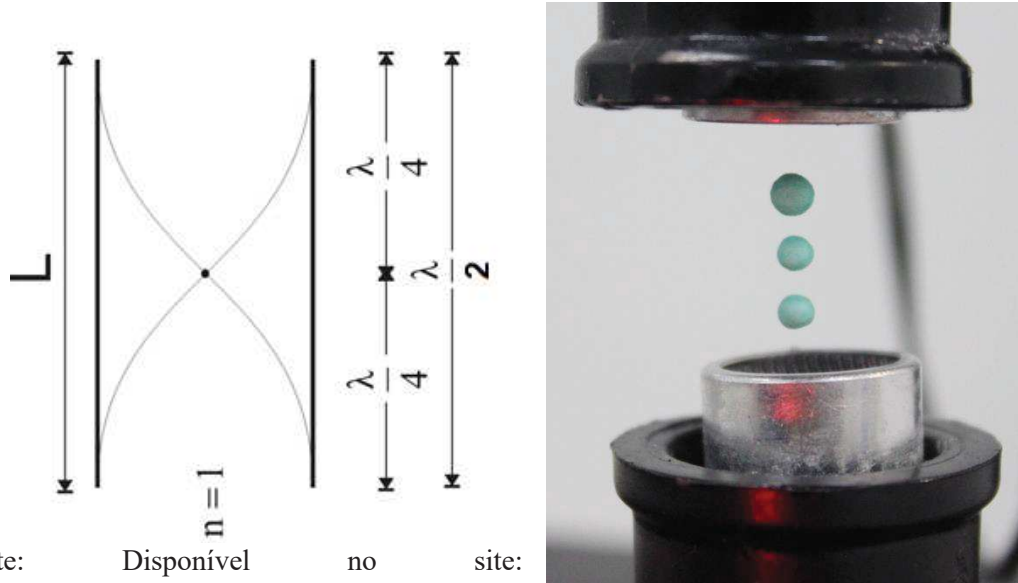
esfera permanece imóvel. Apesar do peso ser tão pequeno, será que podemos negligenciá-lo? Afinal, se algum transdutor, ou ambos estiverem desligados, a esfera cai. A resposta a esta pergunta, na verdade, explica uma das razões pelas quais o modelo de Gor'Kov pede que $R \ll \lambda$. Voltemos nossa atenção para a esfera menor na Figura 16. 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, uma revisão completa sobre o assunto, sugerimos o artigo recente (ANDRADE et al., 2018).

5.2 SIMULANDO ONDAS ESTACIONÁRIAS A PARTIR DA LEVITAÇÃO ACÚSTICA

Para visualizar e quantificar as condições das ondas estacionárias no Levitador Sônico, foram utilizadas esferas de isopor, que vão se equilibrar nas regiões de mínimo potencial, como vimos acima. Existe uma relação direta entre distância entre as esferas ocupam e o comprimento de onda do som emitido pelos transdutores ($L = \lambda/2$). Essa expressão é idêntica àquela do primeiro harmônico em um tubo sonoro aberto (BONJORNIO, 2016).

Assim, simulamos a levitação acústica a ponto de dizer que atua como um tubo sonoro, que é basicamente uma coluna de ar na qual uma onda estacionária longitudinal é gerada. Logo, o nosso produto, ao levitar uma série de esferas de isopor, simula uma sequência de tubos abertos que podemos visualizar na figura 17.

Figura 17 – Tubo sonoro aberto (primeiro harmônico) e a levitação acústica



Fonte: Disponível no site:

(<https://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Acustica/figuras/tubo1.jpg>) no dia 06/09/2021, modificado pelo autor.

6 REFERENCIAL METODOLÓGICO

Nesta etapa da dissertação apresentaremos o referencial metodológico, adotado para elaboração da sequência didática utilizada para a aplicação do Levitador Sônico como recurso para o ensino de ondas mecânicas. Serão abordadas a metodologia investigativa de ensino e a POE (Previsão - Observação - Explicação).

6.1 METODOLOGIA INVESTIGATIVA DE ENSINO

Uma das maiores preocupações dos professores é sobre como despertar nos estudantes a curiosidade pela investigação e incentivar o desenvolvimento de habilidades, como elaborar hipóteses, formular problemas e criar soluções. Segundo Freixo (2012):

Os métodos de investigação traduzem e harmonizam-se com os diferentes fundamentos filosóficos que suportam as preocupações e as orientações de uma investigação. Decorrentes das questões colocadas, certas investigações implicam uma descrição dos fenômenos em estudo, outras, uma explicação sobre a existência de relações entre fenômenos ou ainda a predição ou o controle dos fenômenos (p.171).

Nesse sentido, vamos aprofundar nossos conhecimentos sobre o eixo investigação científica, que tem por princípio colocar os estudantes diante de situações reais nas quais eles possam identificar fenômenos, sejam estes naturais ou sociais. A partir da identificação dos fenômenos, deve-se estruturar o processo de investigação que leve os estudantes a reconhecerem a importância da coleta de dados, da sistematização desses dados e do desenvolvimento de estratégias de pesquisa que permitam identificar problemas e propor soluções. Segundo (Paula, 2004; Lima e Maués, 2006) essas soluções são motivadas, entre outras coisas, pela crença de que entender ciências é tão importante quanto aprender ciências.

Geralmente o processo de ensino por investigação é baseado no levantamento de hipóteses e no teste dessas hipóteses. Então, é fundamental quando pensamos na investigação científica, pressupormos que os estudantes irão desenvolver habilidades que permitam identificar a complexidade do mundo no qual todos nós estamos inseridos. O mundo complexo com o qual vivemos requer intervenções, requer habilidades que permitam às pessoas identificar vários fenômenos em diversas situações. A partir de situações investigativas é possível expressar opiniões baseadas em evidências. Por isso os processos investigativos são extremamente importantes durante a formação científica. O foco pedagógico está centrado na

estruturação de situações didáticas que levem os estudantes a identificar as realidades nas quais eles estão inseridos.

O processo investigativo é uma forma não só de valorizar os estudantes, como também de valorizar a situação dentro do próprio espaço escolar. É preciso entender que a iniciação científica não é atribuição exclusiva das ciências da natureza como normalmente ocorre nas práticas escolares. A investigação é algo inerente a todas as áreas de conhecimento. Estruturar processos de investigação faz com que os alunos possam levantar dados, criar hipóteses, identificar questões, propor soluções, sugerir diferentes abordagens para os problemas, sejam eles regionais, nacionais ou socioambientais. Para desenvolver o processo de investigação científica com os estudantes deve-se ter, inicialmente, uma questão central que envolva situações em que eles sejam instigados a realizar pesquisas para entender e solucionar a questão. Mesmo que para isso eles busquem essas informações por meio de outros recursos disponíveis. Esta abordagem reconhece as tendências pedagógicas básicas para que os alunos possam promover a aprendizagem científica na educação básica com base em sua experiência de trabalho científico (Ainkenhead, 2009; Driver et al. 1999).

Essa busca pelo conhecimento faz com que os estudantes mergulhem nos temas para identificar diferentes formas de abordagens, que possam levar a compreensões dos fenômenos de diferentes maneiras. Mas é preciso compreender que a investigação científica é um processo de longo prazo. O que significa dizer que apenas uma visita ao laboratório com uma atividade experimental pode não representar uma investigação científica, pois o processo de investigação exige várias etapas importantes, que devem ser cumpridas pelos estudantes.

Inicialmente propomos uma pergunta ou uma situação na qual os estudantes possam criar hipóteses e buscar informações ou dados referentes ao fenômeno abordado. No segundo momento é importante que os estudantes revisem as informações anteriores a partir do diálogo com os colegas. Na próxima etapa é importante que seja produzido um novo processo ou estratégia que coloque os alunos em um momento de indecisão sobre as hipóteses criadas. A partir desse processo é fundamental que os estudantes consigam estruturar os dados obtidos até então. É a partir dessa estruturação que se consegue organizar as ideias, ou seja, apropriar-se dos dados como uma ferramenta para interpretar e solucionar os questionamentos, evidenciar os fenômenos e a construção do conhecimento. Com isso é estabelecida através do contexto do problema levando em consideração a estrutura da ciência, o debate, a negociação de sentido entre professor e aluno, a liberdade intelectual do aluno no desenvolvimento de estratégias de resolução de problemas e comunicação de ideias. (Borges, 2002; Sá et al., 2007; Carvalho, 2018).

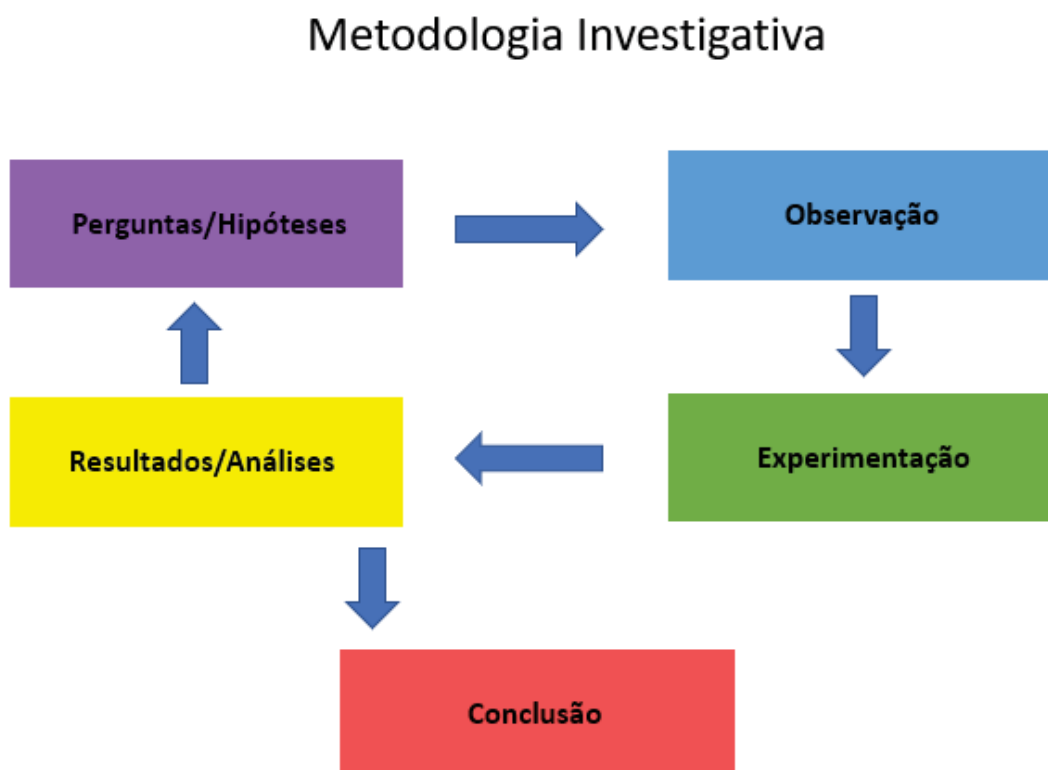
A dinâmica do conhecimento deve permanecer constantemente no processo de construção guiado pelo professor, que tem o grande desafio compreender e estimular o papel do estudante no processo de ensino e aprendizagem.

Existem outros desafios que perpassam os processos de investigação científica. Estes podem envolver outros eixos estruturantes ou situações mais complexas de aprendizagem, por exemplo, um trabalho coletivo, sistematizado e organizado em torno de várias áreas de conhecimento. Assim, o desafio não é só do professor, mas de todo o coletivo envolvido.

A importância da escolha e do planejamento de situações a serem investigadas é essencial para que os estudantes reconheçam a metodologia e concluam que se trata de um processo importante para sua vida, ou que, de alguma forma, acrescente algum novo conhecimento ao conteúdo aplicado. Existem muitas alternativas de ensino por meio de atividades de investigação, “por exemplo: laboratório aberto, demonstração investigativa, textos históricos, problemas e questões abertas, recursos tecnológicos” (Carvalho, 2018, p. 767).

O método investigativo possui etapas que devem seguir uma ordem cronológica. Primeiro vem a observação de um fato ou fenômeno. Após a observação do fato formula-se um questionamento: "por que isso acontece?". A resposta a esta pergunta é o momento da formulação das hipóteses, que são possíveis respostas para um fato ou para um questionamento. Depois devemos testar as hipóteses. As que estiverem erradas devem ser rejeitadas, refutadas. Neste caso, a hipótese deverá ser refeita, até que tenhamos uma hipótese que seja corroborada pelos resultados obtidos na sua testagem. O infográfico apresentado na figura 18 ilustra as etapas da metodologia investigativa.

Figura 18 – Esquema da metodologia investigativa



Fonte: Autor (2020).

Segundo Munford e Lima (2007) ainda existe uma grande lacuna entre a ciência ensinada nas escolas e a ciência praticada nos laboratórios, portanto, a abordagem da pesquisa para o ensino de ciências é a essência da prática científica, como a formulação de hipóteses, desmembrando a ideia de cenários procedimentais para raciocínio, discussão, socialização de resultados, simples verificação da teoria e demonstração do direito.

Conforme Munford, et al (2007):

Aproximar a ciência escolar da ciência acadêmica não é uma tarefa simples. Basta pensarmos sobre algumas diferenças essenciais entre esses dois espaços onde a “ciência” ocorre. Contudo, ao nos voltarmos para as tensões e contradições que podem emergir se essa aproximação for tomada como desejável, isso possibilitaria um melhor entendimento das diferentes tendências dentro do ensino por investigação bem como das polêmicas que emergem das variadas orientações (p.94.).

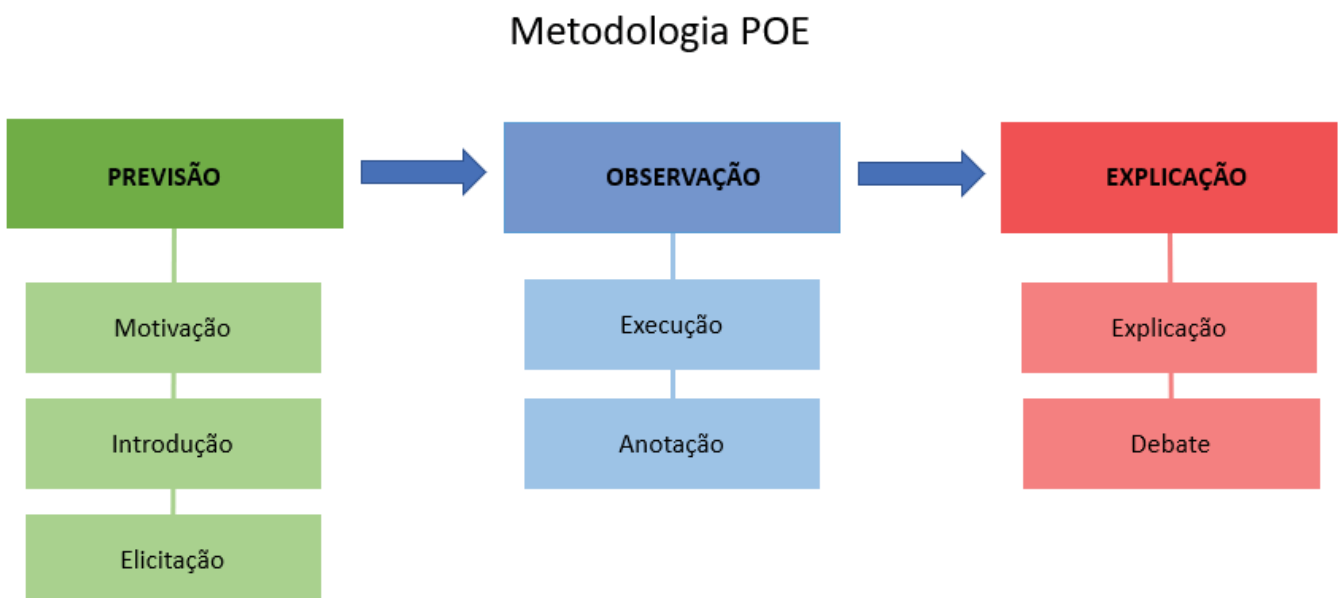
6.2 METODOLOGIA POE DE ENSINO

O método POE (Previsão, Observação e Explicação) foi desenvolvido por dois cientistas da universidade Monash na Austrália, Richard White e Richard Gunstone. Eles publicaram seu trabalho pela primeira vez em um livro chamado *The content of Science*. Neste livro eles abordaram sobre o construtivismo e fizeram referência à Piaget como também a outros pesquisadores do sócioconstrutivismo. Através dessa perspectiva socioconstrutivista, eles desenvolveram o método POE, que trabalha essencialmente com o processo de investigação, colaboração e debate entre os pares.

Trata-se de um método de ensino, mas que também é um método de avaliação, principalmente na avaliação diagnóstica e formativa. Foi proposta por Nedelsky (1961), por White e Gunstone (1992) e citada por Barros (1994), que descreveremos a seguir.

Observamos que o método está dividido em três etapas: a previsão, a observação e a explicação. Cada uma dessas etapas apresenta subdivisões. A etapa da previsão está dividida em três fases: motivação, introdução e elicitación. A etapa da observação divide-se em duas fases: execução e anotação. A terceira etapa também está dividida em duas partes: explicação e debates. Podemos observar essa estrutura no infográfico apresentado na figura 19.

Figura 19 – Esquema da metodologia POE



Fonte: Autor (2020).

A metodologia POE opõe-se ao modelo tradicional de ensino de aulas expositivas. Logo na primeira etapa o professor deve iniciar com um assunto que irá trazer elementos de contextualização e problematização, fazendo com que os estudantes despertem a curiosidade e demonstrem interesse pela relevância do tema. Isso permite que os alunos trabalhem em grupos e compartilhem opiniões, previsões e explicações (TAO; GUNSTONE, 1999).

De acordo com Machado (2008):

O método da descoberta favorece a construção do conhecimento científico mediante o exercício de atividades mais ou menos direcionadas que estimulam o fazer e o pensar, isto é, proporcionam o envolvimento dos alunos em atividades de manipulação de materiais e, além disso, promovem a ocorrência de momentos para reflexão, tomada de decisões e chegada a conclusões. Ensinar química através da descoberta é desenvolver habilidades e atitudes científicas.

A citação acima faz referência direta ao ensino de química, mas que pode naturalmente ser transposto para o ensino de ciências de forma geral.

Na segunda fase é feita a introdução no qual o professor deverá apresentar elementos que fazem parte do problema inicial. É no momento da introdução que apresentaremos as variáveis. Isso é importante não apenas para ativar a memória dos alunos em relação ao tema, mas também para subsidiá-los no sentido de pensar melhor sobre o assunto.

A terceira fase é chamada de elicitación. Nela o professor apresenta algumas perguntas relacionadas ao tema que ficarão à disposição dos alunos. É recomendado que os discentes sejam agrupados em equipes de 2 a 5 pessoas. Nesta etapa cada grupo irá formular uma resposta para a questão proposta. O professor deverá observar se os alunos possuem alguma prospecção do conhecimento prévio sobre o tema pretendido. É importante que os alunos, no momento de discussão, respondam e anotem suas respostas.

A etapa de observação, como já mencionado anteriormente, está dividida em duas fases: execução e observação. Na etapa de observação o professor deve fornecer algum material como fonte de conhecimento. Espera-se que o aluno possa, a partir desse material fornecido pelo professor, extrair as informações que permitam ativar o raciocínio. O professor e os alunos podem comparar as respostas deste momento com as que foram formuladas anteriormente. Na fase de execução podem ser utilizados diversos instrumentos que possibilitem uma simulação ou a visualização do fenômeno a ser estudado. Nesta fase os alunos visualizam o fenômeno e o repetem quantas vezes for necessário. Os alunos devem realizar as anotações pertinentes aos pontos que acreditam que sejam relevantes para explicar o fenômeno observado. Assim poderão fazer prospecções em relação às questões já respondidas na etapa de previsão.

Depois disso, chegamos à última etapa, que é a explicação. Segundo Oliveira (2003), o momento da interpretação é o mais importante. Nesse ponto surgem novos elementos, soluções para o primeiro problema, através das interações e contribuições apresentadas entre os componentes. Nesta etapa cada equipe irá revisar e executar as questões iniciais (volta na etapa previsão, fase de introdução) para retificar ou ratificar suas respostas a partir de suas observações. Neste momento os alunos estarão aprendendo por conta própria, pois as respostas iniciais podem ser modificadas, aumentando o nível de aprofundamento do conhecimento sobre o conteúdo. Essa forma de aprendizagem é autogerida e autoguiada e oportuniza a colaboração e um debate amplo sobre diferentes pontos de vista.

A última fase é o debate. Nele, o professor deve questionar cada equipe se a resposta inicial está igual à resposta final, e solicitar que façam o registro do resultado. Após coletar os registros, o professor deve estimular os alunos a explicar sobre seus resultados. Nesse momento, cada equipe irá se manifestar, cooperando com outras equipes que não alcançaram o acerto da questão proposta. O professor deve estimular a interação entre as equipes e guiar essa interação no sentido do conhecimento pretendido. Após ouvir todas as respostas das equipes, o professor deve fazer as devidas complementações ou ajustes.

De acordo com (Sasaki e Jesus, 2017) a metodologia POE possui três vantagens: A primeira é a compreensão das dificuldades do aluno. A segunda informar o professor sobre o desenvolvimento racional do aluno e o terceiro é servir como base para pesquisa.

6.3 RELAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE INVESTIGAÇÃO E POE

Na metodologia investigativa de ensino, a resolução de problemas está relacionada com a participação dos alunos. Para isso, este deve ter um papel ativo e querer participar, pensar, raciocinar, refletir, verbalizar, escrever e dar opiniões. Do lado do professor, este deve proporcionar momentos que estimulem o interesse cognitivo dos alunos.

A metodologia POE oportuniza um ambiente criativo, colaborativo e investigativo. A autonomia do aluno é a regra principal, por isso trata-se de uma metodologia ativa, com excelente resultado em termos de aprendizagem de acordo com YAMAGUCHI e ARAÚJO, 2020. É também uma forma diferente de ensinar e de avaliar que envolve, ao mesmo tempo, a perspectiva investigativa e colaborativa.

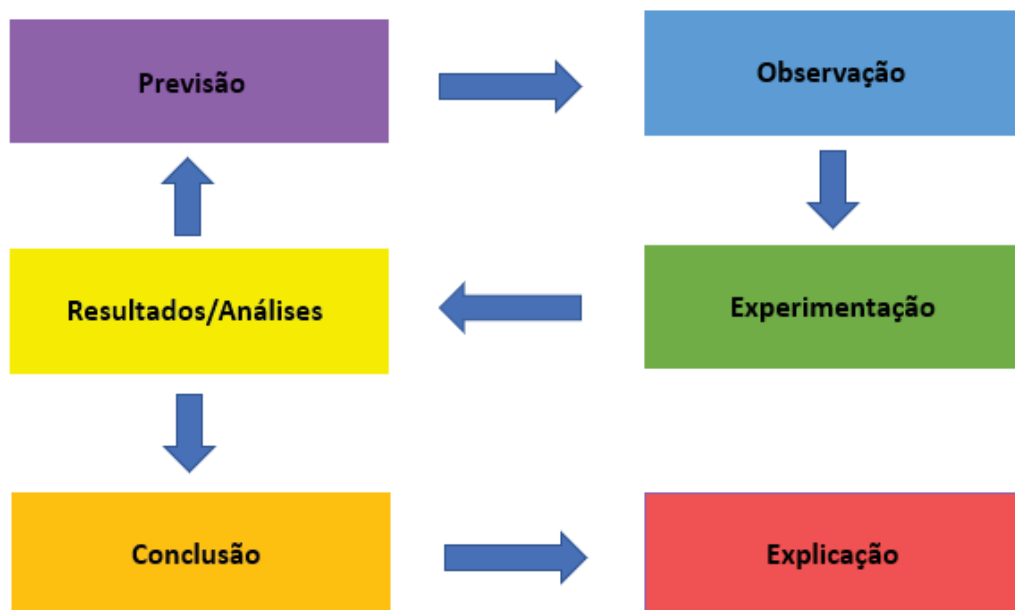
Pelo exposto, optamos por desenvolver uma sequência didática com fortes relações com o processo de investigação. O ponto comum, mais perceptível entre as duas perspectivas metodológicas apresentadas, nos parece ser a mudança de postura do professor em estar

disposto a instigar, pesquisar e investigar. Essa nova postura deve facilitar as interações professor-aluno em sala de aula, aumentando a eficácia do processo de ensino e aprendizagem.

O processo de investigação está interligado em ambas as metodologias adotadas na condução deste trabalho. À primeira vista, o Levitador Sônico, como dispositivo didático, aparenta ser mais observacional do que experimental. Nesse sentido, vislumbramos a possibilidade de articular a perspectiva investigativa das metodologias apresentadas com o dispositivo que criamos, para conduzir a proposta de uma sequência didática investigativa a ser realizada com um único equipamento tecnológico por todos os alunos. Para isso, foi utilizada uma apresentação teórica, sem quebra de continuidade da abordagem conceitual, como elemento para desencadear a motivação e o interesse dos alunos para a aprendizagem do conteúdo de ensino de ondas mecânicas. A sequência didática possui características das duas metodologias conforme mostra a figura 20. Destaca-se as contribuições de estratégias práticas e experimentais, pautadas na investigação, como possibilidade para a formulação de hipóteses de qualidade e perguntas bem estruturadas pelos alunos no decorrer do processo de ensino e aprendizagem.

Figura 20 – Esquema da metodologia aplicada

Metodologia Investigativa/POE



Fonte: Autor (2021).

6.4 DESENVOLVIMENTO DA SEQUÊNCIA DE ENSINO INVESTIGATIVO

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 em que gestores, professores e o sistema educacional se envolvam na busca de novos métodos e instrumentos de ensino que possam fazer da escola e da sala de aula um local mais rico em oportunidades de aprendizado. Neste cenário, o ensino investigativo se faz uma ferramenta que visa estimular os alunos a pensarem, questionarem e refletirem sobre sua própria aprendizagem. Atualmente o cenário educacional vem apontando para um ensino baseado em metodologias ativas, por meio das quais os estudantes são capazes de adquirir habilidades e potencializar a aprendizagem (BERNADI, 2020).

Neste trabalho desenvolvemos uma SEI para a explorar o ensino de ondulatória através das potencialidades do Levitador Sônico como artefato para auxiliar no ensino de ondas mecânicas. Em certo ponto, podemos considerar uma sequência de ensino como um conjunto de atividades 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 de ensino investigativa (MOTOKANE, 2015) apresentada aqui, envolve um diálogo entre o fenômeno da levitação sônica e os fenômenos ondulatórios. A SEI foi montada com a finalidade de mapear as concepções prévias dos alunos acerca dos fenômenos ondulatórios e explorar essas concepções por meio de uma atividade investigativa envolvendo o Levitador Sônico. Nesse sentido, a SEI busca inicialmente apresentar aos alunos organizadores prévios (AUSUBEL, 1968) que podem ser conectados aos conhecimentos dos alunos, facilitando o aprendizado de novos conceitos. Segundo Ferreira, Rocha e Filho (2019, p. 27-28).

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 influência na aprendizagem. Quando há pouca ou nenhuma interação entre os novos conceitos e os anteriores, a aprendizagem é dita mecânica.

A SEI foi organizada para ser aplicada em duas aulas de 50 minutos e dividida em 3 passos. O primeiro passo envolve a aplicação de um questionário para avaliação diagnóstica do conteúdo de ondulatória (APÊNDICE C), que permite identificar os conhecimentos prévios dos estudantes e o quanto ainda necessitam aprender para obtenção de um melhor rendimento cognitivo. A aplicação de uma avaliação diagnóstica permite analisar os conhecimentos prévios dos alunos em relação aos pontos a serem trabalhados e fundamentar o método utilizado pelo

professor, que, por sua vez, consegue enfatizar os pontos que o aluno ainda não domina. Com isso, o professor pode entender as dificuldades dos alunos e as necessidades reais no início do processo de ensino, para planejar as intervenções iniciais.

O segundo passo da SEI envolve a aplicação do Levitador Sônico. Este instrumento é colocado à disposição dos alunos para que eles possam investigar o seu funcionamento, sem a interferência do professor para manipulação, e com isso o docente se torna um mediador, orientador de ensino que assume o papel de questionar, argumentar, estimular e produzir perguntas.

Após um pequeno período de investigação, inicia-se o terceiro passo, que envolve o questionamento cognitivo sobre o fenômeno observado no experimento. O estudante busca 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 40 kHz. 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, para auxiliar o desenvolvimento de uma linha de raciocínio pelos alunos:

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

O processo de investigação proposto é ao mesmo tempo método e objeto, pois o artefato utilizado (Levitador Sônico) inevitavelmente se torna parte do conteúdo ao qual se entrelaça. Desta forma, a linguagem, que é expressão do raciocínio e da inteligência, se desenvolve e juntamente com o conhecimento. 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”. Por isso, optamos pela elaboração de uma SEI.

7 APLICAÇÃO EM SALA DE AULA

De acordo do Borges (2002), o ensino de ciências por meio de investigação é um método de ensino que pode ser implementado pelas atividades do professor através de questões levantadas e da tentativa de encontrar hipóteses, soluções e considerações dos alunos para respondê-las.

A aplicação da Sequência de Ensino Investigativo (SEI) sobre o Levitador Sônico ocorreu em três espaços diferentes: no nono ano de uma escola particular, no terceiro ano do Ensino Médio de uma escola pública e na graduação em Licenciatura em Física de uma instituição pública. O processo foi realizado em sala de aula ou laboratório. Nossa hipótese era de que a interação e a mediação proporcionada pelo aparato tecnológico (Levitador Sônico) poderiam se tornar um elo cognitivo entre o conhecimento que o aluno já possuía em relação aos fenômenos ondulatórios e aquele que seria agregado por meio da SEI.

7.1 REFLEXÃO DA APLICAÇÃO DA SEI EM SALA DE AULA

Realizaremos aqui uma reflexão sobre a aplicação da SEI de modo a evidenciar os resultados e as dificuldades encontradas antes e durante a aplicação. Esta análise será dividida por etapas da SEI e pelo nível de ensino da aplicação, focando no desenvolvimento do aluno.

A aplicação no ensino fundamental foi realizada em 29 de maio, no ensino médio no dia 14 de junho e no ensino superior no dia 14 de maio de 2019. A SEI foi aplicada em instituições de ensino situadas na cidade de Juiz de Fora - Minas Gerais, e ocorreu sempre em duas aulas geminadas, cada uma com 50 minutos de duração. Porém no dia 17 de maio de 2019 foi aplicado um questionário para avaliar as concepções prévias dos estudantes do ensino fundamental e médio, que podemos ver no “Anexo C”. Após a aplicação da avaliação diagnóstica, iniciou-se a aplicação do produto educacional em duas aulas geminadas. O primeiro momento foi destinado à atividade experimental que possui características de uma situação problema que envolvia a explicação do fenômeno da levitação sônica. A segunda aula foi dedicada à problematização inicial, seguida da proposição de hipóteses e discussão orientada pelas questões-chave. Para finalizar foi aplicado um questionário para avaliar a motivação dos alunos em relação à SEI e após foi realizada uma apresentação dos alunos sobre o fenômeno estudado.

7.2.1 Aplicação no Nono Ano do Ensino Fundamental

A turma do nono ano era composta por treze alunos e tinha como característica uma indiferença pelas aulas de Física, assim como pelas aulas de outras disciplinas. O desinteresse em realizar atividades era perceptível.

Nosso foco era o desenvolvimento do conceito de ondas sonoras. Para isso, abrangemos e focalizamos as seguintes possibilidades de definições:

- Período de uma onda;
- Frequência de sonora;
- Comprimento de onda;
- Velocidade de propagação do som;
- Ondas estacionárias.

Inicialmente, foram aplicados testes para averiguar problemas relacionados à base do conteúdo de acústica, esses foram aplicados em data anterior ao início da sequência didática, conforme podemos visualizar na figura 20. Esses testes foram utilizados para explorar a compreensão dos conceitos básicos de ondas sonoras, que seriam desenvolvidos no projeto experimental. Os resultados foram analisados a partir de palavras-chave obtidas a partir das respostas dos alunos.

Figura 20 – Alunos do Ensino Fundamental realizando a avaliação diagnóstica



Fonte: Autor (2019).

A tabela 2 mostra as perguntas da avaliação diagnóstica e o resultado das respostas dos alunos do nono ano do ensino fundamental. Ressaltamos que apresentar ou não habilidades ao longo do processo será importante para identificação de possíveis causas das dificuldades recorrentes no ensino de ondulatória.

Tabela 2 – Resultados da avaliação diagnóstica do Ensino Fundamental

Resultados da Avaliação diagnóstica			
Questão 1	O que é uma onda?		
Resultados	Movimento (43%)	Energia (28%)	Força (29%)
Questão 2	Quais tipos de ondas diferentes você conhece?		
Resultados	Luz (24%)	Sonora (40%)	Eletromagnética (21%) Calor (15%)
Questão 3	Como você acredita que surge uma onda?		
Resultados	Movimento (84%)	Energia (8%)	Espontaneamente (8%)
Questão 4	Você já ouviu falar em movimento oscilatório ou movimento periódico? Se sim, tente explicar o que é e cite exemplo(s).		
Resultados	Não (77%)		Sim (23%)
Questão 5	O que é período na sua concepção?		
Resultados	Tempo (54%)	Distância (31%)	Repetição (15%)
Questão 6	O que é frequência na sua concepção?		
Resultados	Repetição (50%)	Velocidade (17%)	Subperíodo (33%)
Questão 7	Você já ouviu falar em ondas estacionárias?		
Resultados	Não (85%)		Sim (15%)

Fonte: Autor (2020).

Na primeira questão: “o que é uma onda na sua concepção?”, obtivemos o resultado conforme mostrado tabela 2. A maioria dos alunos (43%) respondeu que uma onda é uma forma de movimento. Entendemos que este fato é devido ao processo de identificação com meio concreto vivenciado pelos estudantes. Segundo Machado (2011) quando é recomendado o uso de materiais concretos em sala de aula, quase sempre se adota o conceito de coisas visíveis, manipuláveis, no caso do estudo de ondas o exemplo mais utilizado é o movimento de uma corda. Para Machado (2011), a existência de uma representação concreta do conceito é importante, embora esta não esgote seu significado.

Podemos perceber que os comentários sobre energia e força foi menor do que o comentário sobre movimento, porém os três possuem uma relação em comum. A energia é um conceito de vasta aplicação em física, que é a capacidade de se realizar trabalho. Aplicando força sobre um objeto, fazendo com o que o mesmo se desloque, há variações da energia cinética do objeto. Há várias espécies de forças, tal como há vários tipos de energia. Contudo,

pode-se dizer que os alunos podem ter feito uma correlação dos fenômenos observados na mecânica.

A questão 2 perguntou sobre os tipos de ondas que os alunos conhecem. As respostas estão destacadas na tabela 2. Observando o resultado, pode-se considerar que a construção do conhecimento prévio dos alunos ocorre, em grande parte, pelas informações recebidas no cotidiano, seja pela televisão, no noticiário da previsão do tempo, pelo som produzidos por diversos tipos de aparelhos. Segundo Meksenas (1992), o conhecimento é uma elaboração que ocorre a partir da percepção do concreto transformada e melhorada pela mediação da abstração.

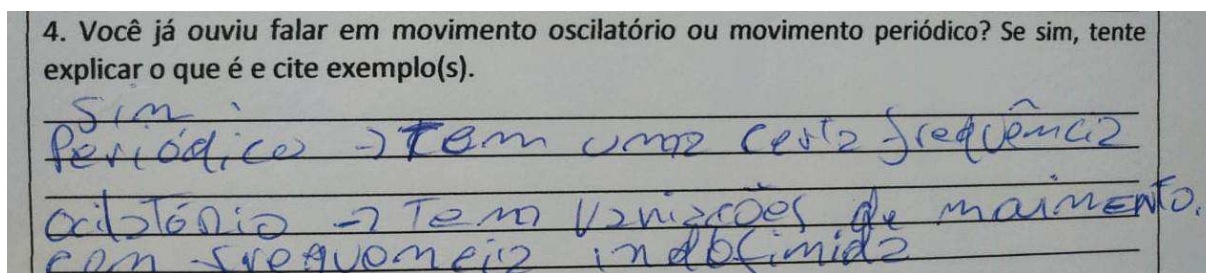
A partir dessa pergunta surgiram algumas situações que os alunos já haviam presenciado em seu cotidiano: a presença de alguns tipos de ondas; e foi mencionado a onda sonora e a onda de rádio. A partir disso, foi discutido o que era uma onda sonora.

A questão 3 busca identificar as concepções que os alunos possuem sobre o que provoca uma onda. As respostas apresentadas na tabela 2 indicam que para 84% dos alunos uma onda surge através do movimento. Para esses alunos a produção de uma onda mecânica se dá por meio de um objeto físico, o que justifica esta resposta. A questão foi pensada para o conceito de onda mecânica e sua influência nos meios materiais, porém não descartamos as respostas relacionadas às ondas eletromagnéticas.

Como pode ser visto nesta questão, a grande maioria dos alunos acreditam que as ondas surgem do movimento. Acreditando-se que todos os tipos de ondas se propagam em um determinado tempo. Contudo esperamos que os alunos através desta reflexão possam agregar o conceito físico de velocidade.

A quarta questão pergunta se o aluno já ouviu falar em movimento oscilatório ou movimento periódico. E, se sim, que tente explicar o que é esse movimento, citando exemplo(s). A maioria (77%) respondeu que “Não”. Conforme ilustra a figura 22: entre os que disseram que “Sim”, obtivemos a seguinte resposta: “Sim. Periódico – tem uma certa frequência. Oscilatório – tem variações de movimento com frequência indefinida”. O interessante desta resposta é que tenta distinguir o movimento oscilatório do movimento periódico.

Figura 22 – Resposta apresentada por um dos alunos



Fonte: Autor (2020).

O resultado apresentado na tabela 2 não corrobora as opiniões dadas pelos estudantes à questão anterior. Ou seja, apesar de não terem estudado formalmente sobre ondulatória, eles possuem alguma informação acerca do tema, as quais foram obtidas, que pode ser a partir da mídia: internet, televisão, documentários, revistas etc.

Na tabela 2 apresentamos os resultados da quinta questão: “o que é período na sua concepção?” Definimos período como o intervalo de tempo para que um movimento cíclico se repita.

Esta questão foi pensada para conceituar o movimento periódico. Na questão 4 a maioria dos alunos indicou não conhecer o que é um movimento periódico. Já na questão 5, os alunos conseguem relacionar, corretamente, período como “tempo” e “repetição”. Entendemos que a maneira como a pergunta foi formulada pode ter interferido no entendimento dela. Isso nos leva a crer que a formulação das questões possam ser um fator que contribua para a resposta do aluno.

Na sexta questão da tabela 2, mostra que 50% dos alunos relacionam frequência como repetição, 33% como subperíodo e 17% como velocidade. A Física é uma disciplina que envolve a definição de diversos termos, com alguns pouco usuais no dia a dia. No caso do termo “subperíodo” acreditamos que os alunos aproveitaram a palavra período e acrescentaram o sufixo sub, que indica inferioridade, para indicar a frequência como algo relacionado ao período. Essa questão foi pensada para ver se o estudante iria relacionar frequência com o número de ciclos por unidade de tempo.

Para mensurar o que os alunos sabem previamente sobre ondas estacionárias foi realizado um questionamento: “você já ouviu falar em ondas estacionárias?” Como podemos visualizar na tabela 2, a maior parte da turma (85%) não ouviu falar em ondas estacionárias.

Quando duas ou mais ondas se propagam em sentidos opostos em algum meio, a sua superposição pode gerar ondas que não se propagam. Neste caso, dizemos que foi formada uma onda estacionária (Moysés 2). A resposta que dois estudantes confeccionaram pode ser

vista na figura 22, que foi próximo do conceito acima. Este é um resultado que foi além do esperado, pois pensamos que nenhum estudante saberia o que seria esse fenômeno.

Figura 22 – Resposta apresentada por um dos alunos

7. Você já ouviu falar em ondas estacionárias? Se sim, tente explicar o que significa, com suas palavras

Sim

Ondas direcionadas no mesmo sentido, posições opostas, com a mesma intensidade

Fonte: Autor (2020).

Após o processo da avaliação diagnóstica, foi apresentado o experimento do Levitador Sônico aos alunos. Nesta apresentação, foram mostrados o botão de ligar e desligar, transdutores, bolinhas de isopor, paquímetro e uma pá para pegar o isopor. Predizer que existe algumas regiões no ar, que pode colocar as esferas de isopor levitando em diferentes regiões, não é uma solução trivial. Cada grupo de estudantes poderia investigar o fenômeno e convocar um dos seus integrantes para ir ao centro da sala, onde todos pudessem visualizar o que estava ocorrendo e realizar a investigação. Neste momento ficou claro que ocorreu uma boa cooperação entre os grupos, sobre a descoberta do fenômeno e o funcionamento do artefato e assim concluindo a explicação da hipótese gerada. Todos ficaram admirados ao observar o fenômeno de levitação.

Neste momento, os alunos foram ágeis na utilização do dispositivo e tiveram dúvidas sobre como utilizar o paquímetro, neste momento o professor interveio e explicou a todos da turma sobre o funcionamento do paquímetro e como realizar medidas de distância com o aparelho.

Os alunos conseguiram colocar três bolinha de isopor em cada região de descompressão e assim realizaram as medidas entre uma bolinha de isopor a outra, o que corresponde a meio comprimento de onda.

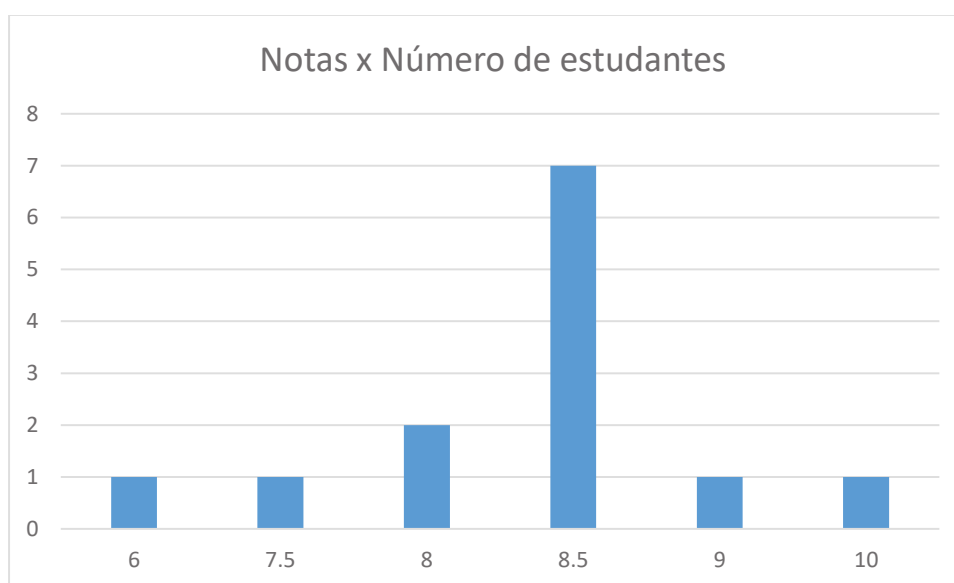
Após a exploração inicial foi feita a seguinte pergunta: “Com esse equipamento é possível estudar ondas de pressão no ar? Os transdutores usados no aparelho emitem uma onda com frequência bem definida, com valor de aproximadamente de 40 kHz. Usando seus conhecimentos prévios, elabore um roteiro de experimento, 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.”.

A partir dessa problematização, os discentes teriam que realizar um cálculo matemático, e a primeira pergunta dos estudantes foi se poderiam utilizar a calculadora. Neste momento, foi informado que não poderia utilizar a calculadora e que todo o material para realizar o experimento já estava disponibilizado. De acordo com as respostas foi perceptível os alunos tiveram dificuldades na parte matemática.

No gráfico 1 é possível observar os resultados qualitativos da pergunta cognitiva aplicada, que está presente no “Anexo D”. Os alunos mostraram um avanço significativo no que tange à elaboração de novos conceitos, adaptação das concepções espontâneas às concepções científicas, no entanto sem dissociá-las.

Gráfico 1 – Resultado gerado pela pergunta cognitiva na aplicação no ensino fundamental.



Fonte: Autor (2020).

Estabelecemos um valor de 0 a 10 na métrica realizada na resposta da pergunta cognitiva, no qual a resposta deve conter a compreensão do fenômeno observado durante o processo. Podemos verificar que nenhum aluno ficou abaixo da média da escola que é de 60% da nota. É possível verificar que a utilização desta sequência didática resultou na construção do conhecimento, estimulação do raciocínio, incentivo à crença na Ciência, além da socialização pra uma comunidade melhor. Para obter resultados satisfatórios foi necessário a participação ativa dos alunos no desenvolvimento das tarefas, permitindo que eles assimilassem com maior clareza os conteúdos teóricos apresentados, despertando interesse em identificar os processos e

fenômenos científicos, alcançando bons resultados. Essa nota não foi atribuída aos alunos, visto que o ensino por investigação visa o conhecimento. A nota atribuída foi um parâmetro para determinar a atuação dos discentes, do docente e do aparato tecnológico.

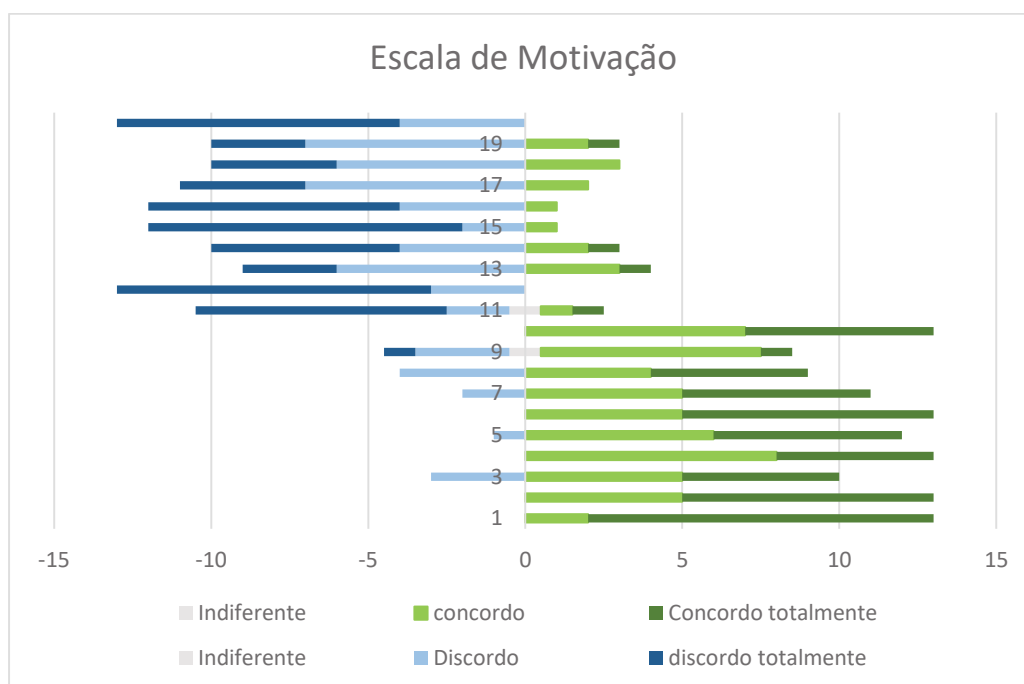
Os roteiros elaborados a partir da questão investigativa foram recolhidos e analisados pelo professor. Na sequência foi desenvolvida uma interpretação da apresentação feita com base no seu objetivo geral que é um questionamento sobre a contribuição para uma compreensão crítica na construção de significados da fundamentação teórica. No início, apresentaram muita timidez, então o professor iniciou com algumas questões e logo após eles ficaram menos inibidos. Por último, realizou-se uma breve discussão destes resultados em vista apresentada nas aulas de regulares de Física, no qual concluímos que a metodologia ativa é fundamental para a motivação dos alunos.

Em relação à motivação dos alunos, torna-se questionável se é por falta de interesse deles ou se não há métodos eficientes elaborados pelos professores para estimular a motivação. É importante salientar que parte da resposta a este questionamento está agregada à relação de dependência entre capacidade e estratégia a fim de potencializar a motivação de boa parte dos alunos.

De acordo com os pressupostos da aprendizagem de Gadotti (1988), em um ambiente estimulante, aprender torna-se descoberta. Somente o que está envolvido na atividade do aluno é preservado por meio da descoberta pessoal; o que está incluído passa a fazer parte da estrutura cognitiva para ser usado em novas situações.

Utilizamos uma escala Likert (UMEKAWA e ZERBINI, 2020), apresentada no gráfico 2, como uma ferramenta para avaliar as opiniões dos estudantes sobre a motivação para realização da atividade. Essa escala nos serviu principalmente para fazer medições e saber sobre o grau de conformidade dos estudantes em relação a uma certa resposta negativa ou afirmativa. As questões propostas podem ser vistas no “Apêndice E”.

Gráfico 2 – Resultado da escala de motivação dos alunos do Ensino Fundamental.



Fonte: Autor (2020).

Com isso podemos observar que as médias de notas foram consistentes em todos os itens. O gráfico 2 mostra os resultados relacionados às alternativas de motivação intrínseca dos alunos do ensino fundamental. Porém, a concordância foi maior do que a discordância, principalmente no que diz respeito a gostar de aulas experimentais, quando o que aprendem os levam a serem mais ativos.

7.2.2 Aplicação no Ensino Médio

Já a classe do Segundo Ano (composta por nove alunos) do Ensino Médio tinha como característica a infrequência nas aulas de Física, a alta participação na disciplina em sala. A motivação para a descoberta dos conceitos físicos durante o momento de investigação são os mesmos da turma do ensino fundamental.

Com a avaliação diagnóstica apresentada na tabela 3, podemos comparar com os resultados dos alunos do ensino médio com os alunos ensino fundamental. Podemos perceber que alguns alunos do Ensino Médio indicaram não saber responder as questões. Podemos supor que isso ocorreu talvez porque eles realmente desconheciam o conceito, ou que tiveram medo de responder errado. Na questão 6: “o que é frequência na sua concepção?” os alunos do Ensino

Médio responderam “subperíodo”, sabendo que tal palavra não existe. Acreditamos que os estudantes devem ter criado esse termo para estabelecer uma correlação entre período e frequência, sabendo que um é inversamente proporcional ao outro.

Tabela 3 – Resultados da avaliação diagnóstica do Ensino Médio

Resultados da Avaliação diagnóstica						
Questão 1	O que é uma onda?					
Resultados	Propagação (55%)	Perturbação (18%)	Energia (9%)	Força (9%)	Não sabe (9%)	
Questão 2	Quais tipos de ondas diferentes você conhece?					
Resultados	Luz (35%)	Sonora (35%)	Eletromagnética (26%)		Energia (4%)	
Questão 3	Como você acredita que surge uma onda?					
Resultados	Propagação (23%)	Movimento (22%)	Perturbação (22%)	Energia (11%)	Força (11%)	Não sabe (11%)
Questão 4	Você já ouviu falar em movimento oscilatório ou movimento periódico? Se sim, tente explicar o que é e cite exemplo(s).					
Resultados	Não (44%)			Sim (56%)		
Questão 5	O que é período na sua concepção?					
Resultados	Tempo (56%)	Frequência (11%)	Distância (11%)	Repetição (11%)		
Questão 6	O que é frequência na sua concepção?					
Resultados	Repetição (67%)	Velocidade (11%)	Energia (11%)	Subperíodo (11%)		
Questão 7	Você já ouviu falar em ondas estacionárias?					
Resultados	Não (100%)			Sim (0%)		

Fonte: Autor (2020).

Após a avaliação diagnóstica, também foi apresentado o experimento Levitador Sônico aos alunos da mesma forma como ocorreu no ensino fundamental. No caso do Ensino Médio, foi perceptível um certo individualismo de cada grupo, o que resultou num clima de competitividade na turma.

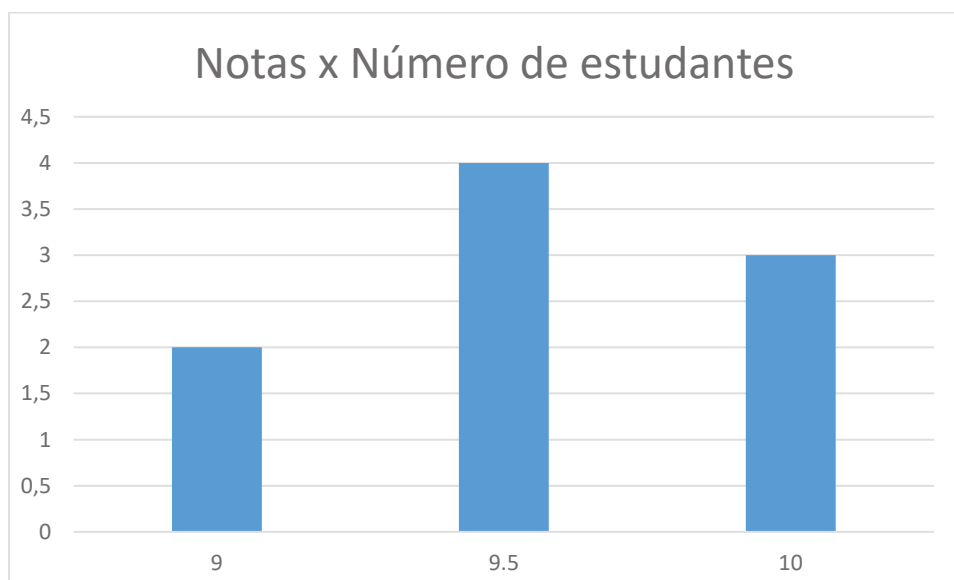
Inicialmente, os alunos pensaram que o Levitador Sônico poderia sustentar somente uma única bolinha de isopor. Neste momento, devido ao tempo restrito da aula, o professor teve que fazer uma intervenção, por meio de indagações, para confrontar as teorias adquiridas, e

assim conseguir progressão da atividade. Depois disso, os alunos conseguiram realizar as medidas da distância de três bolinhas de isopor, que corresponde ao comprimento de onda.

A partir da questão investigativa, os alunos não foram capazes de lembrar nenhum conceito sobre ondas estacionárias. Isso indica que devemos melhorar nossa estratégia de ensino ou os procedimentos didáticos visando uma melhor fixação do conteúdo. Consideramos que o Levitador Sônico é um produto educacional com potencial para preencher esta lacuna.

Através de uma pergunta cognitiva, obtivemos respostas dos alunos, com relação aos conceitos e fenômenos observados através do aparato tecnológico. Com essas respostas obtivemos um gráfico 3.

Gráfico 3 – Resultado gerado pela pergunta cognitiva da aplicação no Ensino Médio.



Fonte: Autor (2020).

Podemos ver que no gráfico 3, que a menor nota obtida foi 9, o que pode ser considerado satisfatório. Comparando os resultados do ensino médio com o do ensino fundamental é possível notar que houve um aumento nos acertos por alunos. Isso indica que as atividades foram proveitosas e provavelmente geraram aprendizado. Também parecem ter contribuído para um melhor domínio do conteúdo de ondulatória. Observa-se que os alunos foram capazes de dominar os conceitos aferidos durante a sequência didática.

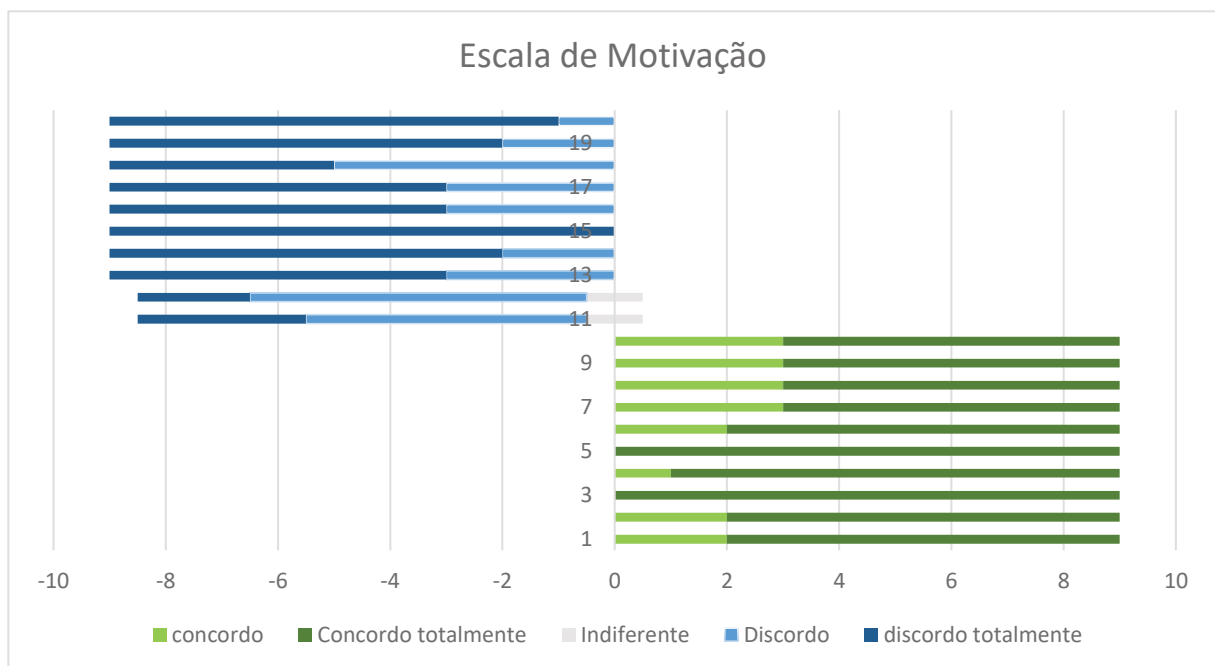
De acordo com Nogaro (2004), os erros podem ser considerados inadequados para resolver o problema, apenas se subjugamos o modelo como correto. Contudo, se não houver um padrão, não há erro. Podem haver ações inadequadas que não conseguem atingir um

objetivo específico. Então, acreditamos que os alunos que demonstram competências e habilidades pretendidas pela atividade, não revelam o saber que foi ensinado, pois a conclusão deste processo termina na fase de explicação.

No ensino médio, em relação ao conhecimento matemático dos alunos, não obtivemos erro. A apresentação da conclusão do trabalho realizado pelos grupos foi bastante interessante. Os alunos levantaram a possibilidade de realizar a medição entre a distância de 2 ou 3 esferas de isopor e chegar à mesma resposta. Porém, concluíram que para realizar o cálculo seria mais fácil de aferir a distância de 3 esferas de isopor.

Foi aplicado o questionário motivacional no qual visa sobre a inserção de aulas experimentais no ensino. Percebemos que a investigação despertou nos alunos a investigação dos fatos, tornando os conteúdos significativamente relevantes. Como está no gráfico 11, percebemos que para que haja motivação no contexto escolar é necessário que a aprendizagem esteja definida como uma iniciação e manutenção, com objetivos e metas a serem executadas. A partir do questionário foi possível comprovar que a experimentação nas suas diferentes formas de abordagens é de fato importante para o aprendizado do aluno, na visualização e na manipulação de materiais e objetos, sendo considerada motivadora.

Gráfico 4 – Resultado da escala de motivação dos alunos do Ensino Médio.



Fonte: Autor (2020).

7.2.3 Aplicação no Ensino Superior

A SEI também foi aplicada em uma turma do ensino superior, que cursavam a disciplina de Física experimental 2. A turma era composta por 14 alunos, sendo que 8 do curso de Licenciatura em Física e 4 do curso de Engenharia Metalúrgica. Essa turma tinha como característica a participação ativa na disciplina e o interesse em realizar atividades experimentais.

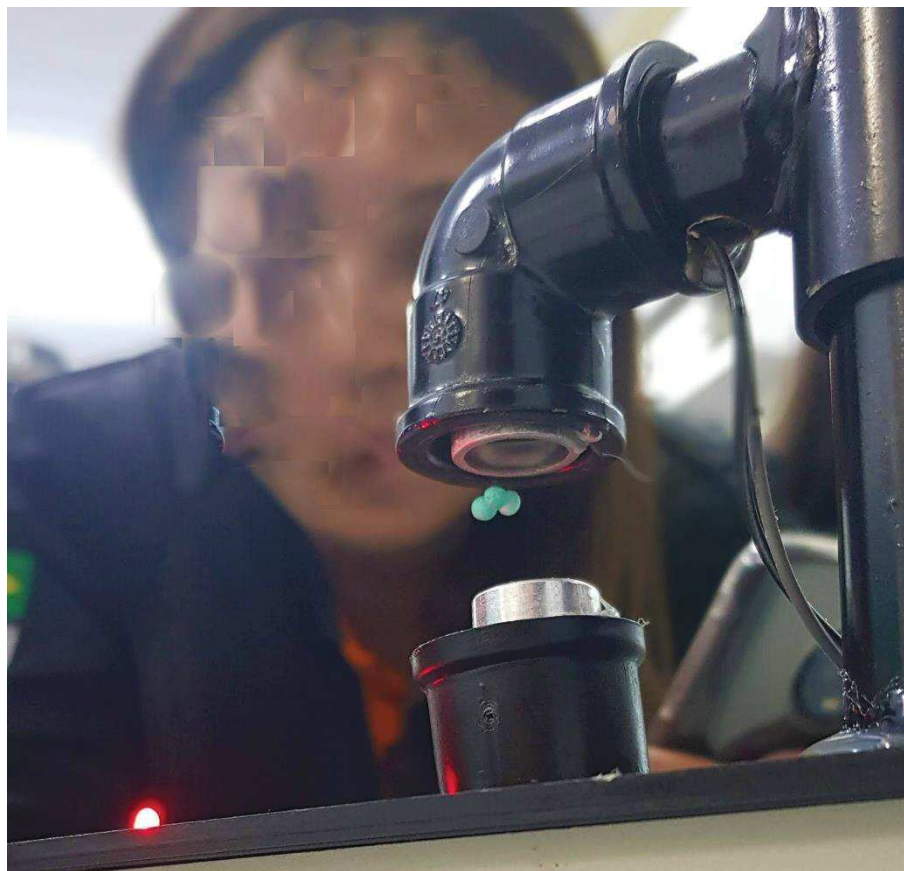
Pelas características da turma, pensamos que os alunos não encontrariam dificuldades com a parte matemática e na conceitualização dos conteúdos. Foi realizado a mesma avaliação diagnóstica em todos os níveis de ensino. Com a turma do ensino superior não encontramos nenhuma peculiaridade, visto que os alunos já haviam cursado ou estavam cursando a disciplina de Física II, que aborda o conteúdo de ondulatória.

Após o teste diagnóstico, foi apresentado o experimento investigativo com o Levitador Sônico. A partir dessa apresentação, os alunos deveriam desenvolver a discussão de ideias, elaborar hipóteses e testar o funcionamento do experimento. O processo de investigação da turma do ensino superior demorou mais do que nos outros níveis de ensino.

Após os alunos desenvolverem os roteiros investigativos do experimento, cada grupo fez uma apresentação oral de sua proposta e do uso metodológico do experimento. Os alunos demonstraram grande satisfação em relacionar a prática desenvolvida pelo Levitador Sônico, com o Tubo de Kundt. Primeiramente eles assinalaram a relação de ruído de ambos os aparatos tecnológicos. Visto que o Levitador Sônico apresenta ruído, porém não na faixa audível pelo ser humano. Também perceberam que o experimento do Tubo de Kundt é realizado horizontalmente (e em muitos casos se faz a assimilação com as ondas verticais) e no Levitador Sônico o fenômeno é observado verticalmente. Contudo eles acreditavam que havia somente um local que poderia conter todas as bolinhas de isopor. Através deste experimento ficou claro para os estudantes de graduação as diferenças entre as características das ondas. Podemos perceber que as abordagens dos livros didáticos só funcionam em sistemas ideais e servem para ter uma ideia de como as ondas sonoras se comportam, os livros também muitas das vezes tratam as ondas longitudinais como ondas verticais em desenho, com isso os alunos, quando se deparam com uma onda longitudinal, realizam o tratamento como se fosse transversal, conforme descrito no capítulo 2.

Além disso, a turma encontrou dificuldades para equilibrar as esferas de isopor em diferentes alturas, conforme podemos observar na figura 23.

Figura 23 – Aplicação experimental no Ensino Superior.



Fonte: Autor (2020).

O resultado da aplicação do produto mostra que o Levitador Sônico, como proposta didática, é um aparato tecnológico que atua como elemento motivador e contextualizado para o ensino de ondas. Configura-se como uma boa alternativa didática, principalmente, em turmas do ensino básico e superior que apresentam dificuldades com a parte conceitual e prática de ondulatória.

Depois de analisar esses resultados, verifica-se que a metodologia ativa utilizada estimula uma maior responsabilidade e participação dos estudantes na construção do próprio saber. Juntamente a esse processo, as aulas tornam-se mais instigantes devido a nova forma como os estudantes encaram o processo de ensino e aprendizagem.

8 CONCLUSÃO

Planejar uma atividade experimental que seja lúdica, educativa e que esteja inserida em um contexto inovador, não é uma tarefa simples. Relatamos nesta dissertação uma possibilidade de atividade que perpassa por vários problemas relacionados ao desenvolvimento do conhecimento científico: o trabalho colaborativo, a combinatória de elementos científicos com elementos tecnológicos na experimentação, 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 no desenvolvimento do Levitador Sônico.

Sobre os resultados obtidos, podemos dizer que este trabalho apresenta três pontos de considerável importância: a construção de um Levitador Sônico 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.

Com a confecção do produto educacional, cuja proposta didática é demonstrar de forma investigativa a levitação acústica dos corpos, podemos concluir que os objetivos propostos foram alcançados, pois o Levitador Sônico despertou o interesse dos alunos pelos fenômenos físicos, e contribuiu para que melhorassem o aprendizado sobre ondas sonoras. Além disso, esse artefato proporciona uma inovação no ensino de Física, pois permite investigar fenômenos acústicos com os alunos e explicar conceitos físicos que muitas vezes são transmitidos sem a devida relevância para sua compreensão.

A aplicação metodológica do produto educacional por meio de uma sequência de ensino investigativo, ajudou a promover uma discussão positiva entre os grupos de alunos e o professor na busca pelo conhecimento. Uma proposta de ensino por investigação tem como propósito despertar o interesse do aluno, torná-lo mais receptivo aos novos conceitos físicos por meio de questões-problema. Com isso, o docente passa a ter um papel mais centralizado na orientação do trabalho dos alunos com o objetivo de guiar o raciocínio científico dos discentes.

Demonstrações investigativas, realizadas por meio de aparatos tecnológicos em sala de aula, podem proporcionar aos professores e aos alunos uma melhor percepção dos fenômenos físicos, tornando o ensino algo mais motivador e a aprendizagem algo mais significativa e expressiva. Assim, o Levitador Sônico se configurou numa ferramenta fundamental e criativa para a aprendizagem do conteúdo de ondas sonoras no estudo da Física.

Por fim, entendemos que este trabalho pode contribuir para que a escola se torne um espaço de inovação, deixando de lado a memorização e a reprodução dos conteúdos, focando no intelectual.

REFERÊNCIAS

- AIKENHEAD, G. **Educação Científica para todos**. Lisboa: Edições Pedagogo, 187p, 2009.
- 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.
- AUSUBEL, D. P. **Educational Psychology: A Cognitive View**. New York: Holt, Rinehart and Winston. 1968. 685 p.
- BARROS, S. S. **Pontas de prova para o diagnóstico da aprendizagem de física na escola: Um desafio para o professor**. Apostila, Instituto de Física – UFRJ, 1994.
- BERNARDI, M. **Didática e metodologias ativas de ensino-aprendizagem**. Editora Senac São Paulo, 2020.
- BONJORNO, J. R. et al., **Física**. v. 2, São Paulo: FTD, 2016.
- BORGES, Antônio Tarciso. **Novos rumos para o laboratório escolar de ciências**. Caderno Brasileiro de ensino de Física, v. 19, n. 3, p. 291-313, 2002.
- BRASIL, **Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio**. Brasília: MEC/SEMTEC, 2002a.
- BRILLOUIN, L. **Les pressions et tensions de radiation**, Rev. d'Acoust., v. 5, p. 99-111, 1936.
- CARVALHO, A. M. **Fundamentos Teóricos e Metodológicos do Ensino por Investigação**. Revista Brasileira De Pesquisa Em Educação Em Ciências. v. 18, n. 3, p. 765-794, 2018.
- CAVALCANTE, M. A.; MONTEIRO, C. E.; PONTES, L. A., **Novas tecnologias no estudo de ondas sonoras**, Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 30, n. 3, p. 579–613, 2013.
- 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.
- FREIXO, M. **Metodologia Científica**. 4ª Edição. Lisboa: Instituto Piaget, 2012.
- FUSHIMI, T. et al. Nonlinear trapping stiffness of midair single-axis acoustic levitators. Applied Physics Letters, [s.l.], v. 113, n. 3, p.034102-034123, 16 jul. 2018.
- GALILI, I. **Towards a Refined Depiction of Nature of Science: Applications to Physics Education**. Science & Education, v. 28, p. 503–537, 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.
- NUSSENZVEIG, H. M., **Curso de Física Básica 2 Fluidos, oscilações e ondas, calor**. Ed. Edgard Blücher LTDA São Paulo, 2014.

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.

LIMA, M. E. C. C.; MAUÉS, E. **Uma releitura do papel da professora das séries iniciais no desenvolvimento e aprendizagem de ciências das crianças.** Ensaio, V 8, n. 2, p.161-175, dez. 2006.

MACHADO, N. J. **Matemática e Língua Materna: análise de uma impregnação mútua.** 6 ed. São Paulo: Cortez, 2011

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.

MUNFORD, D.; LIMA, M. E. C. C. **Ensinar ciências por investigação: em que estamos de acordo?** Ensaio - Pesquisa em Educação em Ciências, v. 9, n. 1, p. 72-89, 2007.

NEDELSKY, L. **Science Teaching and science testing.** Chicago University Press, 1961.

NOGARO, Arnaldo; GRANELLA, Eliane. **O erro no processo de ensino e aprendizagem.** Revista de Ciências Humanas, v. 5, n. 5, p. 31-56, 2004.

PAULA, H. **A ciência escolar como instrumento para a compreensão da atividade científica.** Tese (doutorado em educação). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.

HALLIDAY, D. RESNICK, R. WALKER, J. **Fundamentos de Física. Volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica.** Rio de Janeiro: LTC, 2009.

ROCHA, A.N.; RIZZUTI, B.F.; MOTA, D.S., **Transformações de Galileu e de Lorentz: um estudo via teoria de grupos,** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 35, n. 4, 2013.

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.

SASAKI, D. G. G.; JESUS, V. L. B. **Avaliação de uma metodologia de aprendizagem ativa em óptica geométrica através da investigação das reações dos alunos.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 39, n. 2, 2017.

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.

TAO, P. K.; GUNSTONE, R. F. **Conceptual Change in Science through Collaborative Learning at the Computer.** International Journal of Science Education, v.21(1), p.39-57, 1999.

UMEKAWA, E. E. R.; ZERBINI, T., **Estratégias de aprendizagem na educação a distância: revalidação de uma escala,** Psico, v. 51, n. 2, p. e29638, 2020.

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.

WHITE, R.; GUNSTONE, R. **Probing Understanding.** NY: The Falmer Press, 1992.

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.

YAMAGUCHI, K. K. L.; ARAÚJO, E. A. **Uso do modelo POE (previsão-observação-explicação) aplicando as disciplinas de química e matemática em favor do meio ambiente.** REAMEC-Rede Amazônica de Educação em Ciências e Matemática, v. 8, n. 1, p. 96-111, 2020.

ANEXO A - LIVROS DIDÁTICOS

Os dados obtidos no Quando 1 indica que as coleções avaliadas que está descrita na Tabela 1.

Tabela 2 – Lista dos Livros didáticos avaliadas

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.

Fonte: Autor (2019).

ANEXO B - O CÓDIGO FONTE DO LIVITADOR SÔNICO

A programação descrita no Quadro 2 envolve a codificação, compilação e integração entre a linguagem de programação e a execução do Arduino Uno.

Quadro 2 - 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(){
  // aqui não tem nada :-(-
}

```

Fonte: Autor (2019).



ANEXO C – AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA

Tabela 2 – Avaliação diagnóstica

1	O que é uma onda na sua concepção?
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 período na sua concepção?
6	O que é frequência na sua concepção?
7	Você já ouviu falar em ondas estacionárias? Se sim, tente explicar o que significa com suas palavras.

Fonte: Autor (2019).

ANEXO D – PERGUNTA COGNITVA

 INSTITUTO FEDERAL SUDESTE DE MINAS GERAIS Campus Juiz de Fora	<h2>Aplicação</h2>	 UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
Nome: _____ Curso: _____		
Data: ___/___/20___ Disciplina: _____		
<p>Questão – Levitador Sônico – 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 40 kHz. 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.</p>		
Passo 1: Quais os fenômenos físicos presentes no experimento realizado?		
Passo 2: Quais grandezas físicas você consegue medir neste experimento?		
Passo 3: Relacione os fenômenos observados com as grandezas medidas.		

ANEXO E – AVALIAÇÃO DE MOTIVAÇÃO

QUESTIONÁRIO					
PERGUNTAS	CT	C	N	D	DT
1. Acho os experimentos muito importantes, e gosto das aulas experimentais.					
2. Os experimentos são fascinantes e divertidos.					
3. Os experimentos me fazem sentir seguro e ao mesmo tempo são estimulantes.					
4. O sentimento que tenho em relação aos experimentos são bons.					
5. Os experimentos são ações que eu aprecio grandemente.					
6. Gosto realmente de experimentos.					
7. Os experimentos são uma das atividades que eu realmente gosto de estudar na escola.					
8. Fico mais feliz nas aulas experimentais que na aula experimental de qualquer outra matéria.					
9. Sinto tranquilo em física e gosto muito dessa matéria.					
10. Tenho uma reação definitivamente positiva com relação aos experimentos: Gosto e aprecio.					
11. Fico sempre sob uma terrível tensão na aula experimental.					
12. Não gosto de experimentos e me assusta muito ter que fazer.					
13. Tenho branco e não consigo pensar claramente quando vejo um experimento.					
14. Tenho sensação de insegurança quando me esforço para entender os experimentos.					
15. Os experimentos me deixam inquieto(a), descontente, irritado(a) e impaciente.					
16. Os experimentos me fazem sentir como se estivesse perdido(a) em uma selva de números e sem encontrar a saída.					
17. Quando eu ouço a palavra experimento, tenho sentimento de aversão.					
18. Encaro os experimentos com sentimento de indecisão, que é o medo de não ser capaz.					
19. Pensar sobre a obrigação de resolver um problema através de um experimento me deixa nervoso(a).					
20. Nunca gostei das aulas experimentais, esta é a matéria que me dá mais medo.					
Obs.:					
LEGENDA: CT = CONCORDO TOTALMENTE, C = CONCORDO, N= NEUTRO, D = DISCORDO, DT = DISCORDO TOTALMENTE					

ANEXO F – CONFECÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

Márcio Fernandes Santana da Costa

**LEVITADOR ULTRASSÔNICO:
Explorando a física da levitação acústica**

Este produto educacional é parte integrante da dissertação: LEVITAÇÃO ACÚSTICA E O ENSINO DE ONDULATÓRIA - UMA ABORDAGEM INVESTIGATIVA, desenvolvida no âmbito do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 24 – UFJF / IF Sudeste-MG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador(es):

Nome do Orientador Prof. Dr. Bruno Ferreira Rizzuti

Nome do Coorientador Prof. Dr. Bruno Gonçalves

Juiz de Fora
2021

Sumário

1. Introdução.....	3
2. ROTEIRO DE MOTAGEM DO LEVITADOR ULTRASSÔNICO.....	4
2.1. MATERIAL UTILIZADO.....	4
2.2. MÉTODO DE MONTAGEM.....	5
2.3. CÓDIGO FONTE.....	9
3. ROTEIRO DE APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL.....	10
3.1. AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA.....	12
3.2. PERGUNTA COGNITIVA.....	13
REFERÊNCIAS.....	14

1. INTRODUÇÃO

O produto educacional apresentado aqui é direcionado para professores de Ciência do Fundamental II e Física e em início de graduação. O produto, que chamaremos de Levitador Sônico, consegue demonstrar experimentalmente a levitação acústica de objetos de baixa densidade, fornecendo uma alternativa diferenciada para a construção do conhecimento dos alunos sobre fenômenos de oscilações e ondas, além de ser visualmente atrativo.

Elaborado com Arduino e outros componentes de baixo custo, é de fácil reprodução e operação. Ele é compacto o suficiente para viabilizar a execução de atividades experimentais, sendo assim muito útil principalmente para alunos e professores, os quais muitas vezes, não dispõem de laboratórios e equipamentos. O aparato pode ser útil para promover a interação entre os alunos e o conhecimento científico associado às ondas sonoras estacionárias. Também entendemos que a inserção do aluno em um meio inovador pode potencializar o interesse desses estudantes em atividades de ensino.

A fim de torná-lo acessível aos professores de Física, esse manual traz dois roteiros, sendo que um descreve passo a passo a montagem do Levitador Sônico e o outro dá suporte à execução de uma possível atividade experimental. Vamos explicar como nosso aparato é capaz de emular ondas estacionárias para a suspensão de objetos no ar.

Baseado no trabalho do Andrade (2017), que revisa os métodos de levitação acústica para suspender objetos em posições fixas, seguido pelas técnicas que permitem a manipulação de objetos, fizemos a apropriação da tecnologia para introduzir a levitação acústica ao ensino de Física.

Por fim, vale ressaltar que este produto é fruto de uma pesquisa desenvolvida na disciplina de Atividades Experimentais para o Ensino Médio e Fundamental do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) – polo 24 – UFJF / IF Sudeste MG, realizada no primeiro semestre de 2019.

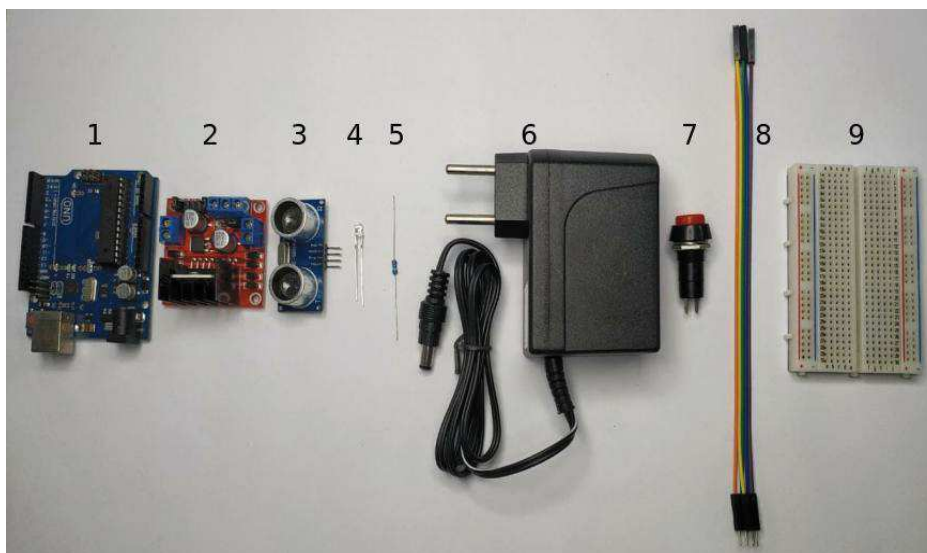
2. ROTEIRO DE MOTAGEM DO LEVITADOR ULTRASSÔNICO

Nosso sistema de levitação acústica é formado por dois transdutores de ultrassom, que operam numa frequência de 40 kHz e possuem uma face circular de 16,0 mm de diâmetro. Os dois transdutores estão na posição vertical com as faces viradas entre si (MARZO, 2017). A distância entre os transdutores é de aproximadamente de 14,7 mm. 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 na seção 2.3. Nas próximas subseções detalharemos os materiais e a montagem do aparato.

2.1. MATERIAL UTILIZADO

Para montar o Levitador Sônico, usamos os seguintes componentes elétricos/eletrônicos enumerados abaixo com a respectiva legenda na Figura 1:

Figura 1 – Componentes para montagem do Levitador Sônico



Fonte: Autor (2020).

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 3,0mm de diâmetro de alto brilho vermelho, que funciona como lâmpada piloto;
5. Uma fonte 12 V (especificações: marca UNITEL, entrada: 100-240 AC, saída: 12V DC, corrente: 1A);
6. Um *switch button* (especificações: marca Daie; modelo PBS 11A; tensão 12V; corrente máxima na chave 3A/250V);
7. Um Resistor de filme de carbono de 220 Ω , de 1/4W e tolerância de +/-5% Ω ;
8. Vários *jumper*s.
9. Uma *proto*board.

2.2. MÉTODO DE MONTAGEM

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, retiramos a peça do circuito impresso. Para identificar qual dos sensores é o transdutor, procura-se visualizar o que tem a letra “T” escrito 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 2.

Figura 2 – Detalhes do transdutor retirado do sensor ultrassônico

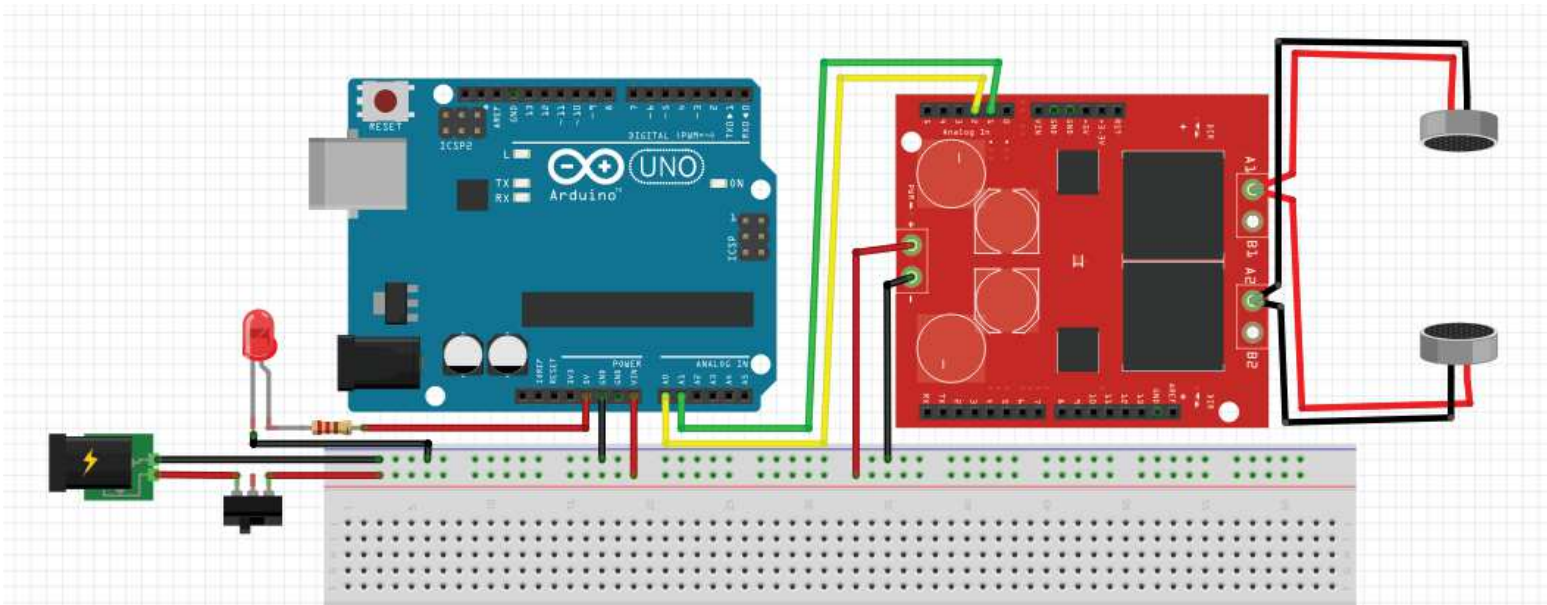


Fonte: Autor (2020).

- 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 botton* 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 6~35V 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 Ω (1/4W) na perna mais comprida 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/1A. Para isso, ligamos dois jumpers, saindo da protoboard já energizada, sendo que o polo positivo é conectado ao V_{in} e o negativo no GND.

Os componentes e o esquema de montagem descritos acima podem ser vistos na figura 3.

Figura 3 – Esquema de montagem da parte eletrônica do Levitador Sônico



Fonte: Autor (2020).

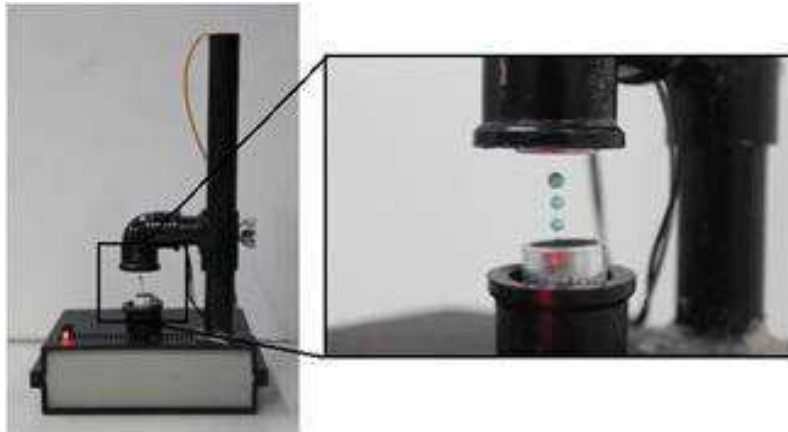
Já na sua versão final, podemos ver o circuito do Levitador Sônico envolto por uma caixa plástica, sendo que um dos transdutores fica preso à caixa e o outro a um suporte feito com PVC. Sua altura pode ser ajustada por uma borboleta. Os detalhes estão nas Figuras 4 e 5.

Seguimos ainda os seguintes passos para a montagem final do Levitador Sônico:

- a) Sugere-se armazenar as pequenas esferas de isopor que serão levitadas em um recipiente para evitar que elas se espalhem durante a utilização do produto;
- b) Construimos uma mini espumadeira (especificações: 103,0mm de comprimento, 5,3mm de diâmetro de base, 14,0mm de diâmetro de concha) que é utilizada para colocar as pequenas esferas de isopor levitando entre os dois transdutores;
- c) Construimos um cabo de verificação, com fio fino, fazendo um arco circular na extremidade.

Ao passar o arco envolvendo as esferas, legitimamos o experimento, comprovando que as esferas não estão penduradas por um suposto fio; A Figura 4 mostra o aparato em funcionamento, com pequenas esferas de isopor levitando.

Figura 4 – Visualização do isopor levitando.



Fonte: Autor (2020).

Os detalhes do cabo de verificação e da espuma depositando uma esfera estão destacados na Figura 5.

Figura 5 – Levitador Sônico em funcionamento.



Fonte: Autor (2020).

2.3. CÓDIGO FONTE

Este código fonte é para ser utilizado no microcontrolador Arduíno.

```
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() {
  // aqui não tem nada :(
}
```


3. ROTEIRO DE APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

A aplicação que apresentaremos é composta de 2 aulas de 50 minutos, dividida em 4 passos, são eles:

No primeiro passo, aplica-se um questionário para avaliação diagnóstica do conteúdo de ondulatória que se encontra na seção 3.1, que permite identificar os conhecimentos dos estudantes e quanto ainda necessitam aprender para obtenção de um melhor rendimento cognitivo.

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, que se pode conferir na seção 3.2. O estudante deve compreender o seu funcionamento e desenvolver uma resposta argumentativa. A partir do questionamento, o aluno obtém um motivo o qual será responsável por impulsionar o mesmo na busca pela ampliação de seus conhecimentos. Promove um interesse do aluno pelo conhecimento, que é um do propósito do experimento, o que torna em um processo diálogo entre seus colegas, não linear e inexato de construção do seu próprio conhecimento.

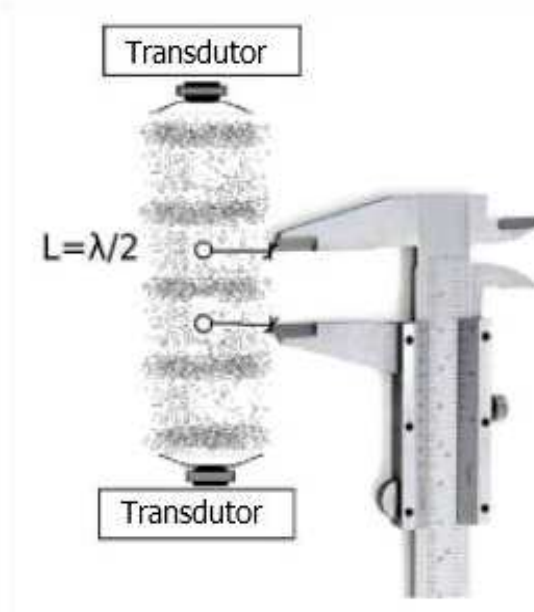
Também foi criada uma sequência de perguntas. Como direcionamento solicita-se que os alunos respondam:

- 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.”

Embora tais perguntas direcionem os estudantes, eles são deixados livres tanto para a execução de medidas, quanto para elaboração das respostas. Tal liberdade é essencial no ensino por investigação. 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, trata-se de um efeito de ordens superiores. Contudo, a expressão $L = \frac{\lambda}{2}$ 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, conforme a ilustração da figura 6.

Figura 5 – Ondas sonoras na vertical como deslocamento e pressão no Levitador Sônico, mantendo as esferas de isopor flutuando.



Fonte: Autor (2020).

Os transdutores possuem a frequência de 40 kHz, e com a aferição é possível calcular a velocidade do som no ambiente. Através da expressão $v = \lambda \cdot f$, basta substituir os valores obtidos e resolver a expressão matemática, o valor deve ser aproximado de 340 m/s .

A atividade proposta é investigativa, trabalha várias habilidades nos alunos (ZÔMPERO, LABURÚ, 2011) e pode direcioná-los a uma condição de aprendizado autônomo. A ação dos alunos origina de uma situação-problema, para a qual o aluno deve formular uma proposta de resolução, só aumenta quando essa não é capaz de solucionar o problema inicial, e o conhecimento. Assim, os alunos podem seguir de forma de diversas perceptivas entre eles, gerando discussões de rico valor científico.

3.1. AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA

Questionário de avaliação diagnóstica	
Escola: _____	
Nome: _____	Data: / /
1. O que é uma onda na sua concepção?	
Resposta:	_____ _____ _____
2. Quais tipos de ondas diferentes você conhece?	
Resposta:	_____ _____ _____
3. Como você acredita que surge uma onda?	
Resposta:	_____ _____ _____
4. Você já ouviu falar em movimento oscilatório ou movimento periódico? Se sim, tente explicar o que é e cite exemplo(s).	
Resposta:	_____ _____ _____
5. O que é frequência na sua concepção?	
Resposta:	_____ _____ _____
6. Você já ouviu falar em ondas estacionárias? Se sim, tente explicar o que significa com suas palavras.	
Resposta:	_____ _____ _____

REFERÊNCIAS

Andrade, M. A. B.; Pérez, N.; Adamowski, J. C. Review of Progress in Acoustic Levitation. *Brazilian Journal Of Physics*, [s.l.], v. 48, n. 2, p.190–213, 30 dez. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s13538-017-0552-6>.

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.

ZÔMPERO, A. F.; LABURÚ, C. E. Atividades investigativas no ensino de ciências: Aspectos históricos e diferentes abordagens. *Revista Ensaio*, v.13, n. 03, p. 67-80, 2011.