



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
LICENCIATURA EM FÍSICA**

DIEGO DA MOTA COLARES

**CRIAÇÃO DE UM MINILEVITADOR ACÚSTICO ULTRASSÔNICO DE BAIXO
CUSTO COMO PRODUTO EDUCACIONAL NO ENSINO DE FÍSICA**

FORTALEZA

2018

DIEGO DA MOTA COLARES

CRIAÇÃO DE UM MINILEVITADOR ACÚSTICO ULTRASSÔNICO DE BAIXO CUSTO
COMO PRODUTO EDUCACIONAL NO ENSINO DE FÍSICA

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Física do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Tarso Cavalcante Freire.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C649c Colares, Djego da Mota.
CRIAÇÃO DE UM MINILEVITADOR ACÚSTICO ULTRASSÔNICO DE BAIXO CUSTO COMO
PRODUTO EDUCACIONAL NO ENSINO DE FÍSICA / Diego da Mota Colares. – 2018.
39 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências,
Curso de Física, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Paulo de Tarso Cavalcante Freire.

1. Ensino . 2. Física. 3. Levitação Acústica. 4. Força de Radiação Acústica. I. Título.

CDD 530

DIEGO DA MOTA COLARES

CRIAÇÃO DE UM MINILEVITADOR ACÚSTICO ULTRASSÔNICO DE BAIXO CUSTO
COMO PRODUTO EDUCACIONAL NO ENSINO DE FÍSICA

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Física do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Tarso Cavalcante Freire.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo de Tarso Cavalcante Freire (orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Nildo Loiola Dias
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Bruno Tavares de Oliveira Abagaro
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Dedico este trabalho aos meus pais, Maria da
Conceição da Mota e Francisco Pereira
Colares.

AGRADECIMENTOS

A toda minha família, principalmente aos meus pais, por estarem sempre comigo em todos os momentos da minha vida. Ao Dakila Pesquisas por mudar positivamente a minha vida em todos os aspectos e por promover o meu encontro com outras pessoas que também buscam conhecimento de forma independente.

Ao Prof. Dr. Paulo de Tarso Cavalcante Freire pela excelente orientação dada nesta monografia. Aos meus amigos de graduação José Vinícius Façanha, Flávio Soares, Rondinelly Oliveira, Antônio Netto e aos tantos outros.

Aos demais professores do departamento de Física da Universidade Federal do Ceará por contribuírem de forma direta e indireta na minha formação acadêmica e científica.

“Se você quiser descobrir os segredos do Universo, pense em termos de energia, frequência e vibração.” (Nikola Tesla)

RESUMO

Esta monografia visa à criação de um minilevitador acústico ultrassônico de baixo custo. Esse levitador é um produto educacional em Física na área da Acústica cujo objetivo é melhorar o ensino de física por meio da abordagem de fenômenos acústicos que não são normalmente analisados com tanta frequência no ensino médio, como a levitação acústica de pequenos corpos. Esse produto serve também como ferramenta didática para professores do ensino médio, especialmente, para os do ensino público. Diante disso, foi feito neste trabalho uma pequena introdução histórica da levitação acústica, uma explanação teórica da levitação acústica, os procedimentos de montagem do minilevitador acústico ultrassônico de baixo custo e um plano de aula com uma metodologia investigativa que consiste em uma demonstração investigativa. O produto educacional elaborado mostra ser totalmente viável para a aplicação em uma sala de aula do ensino médio, principalmente em escolas públicas, devido a sua inovação, facilidade e custo reduzido.

Palavras-chave: Ensino. Física. Levitação Acústica.

ABSTRACT

This monograph aims to create a low cost ultrasonic acoustic mini levitator. This levitator is an educational product in physics in the area of acoustics whose objective is to improve the teaching of physics by approaching acoustic phenomena that are not normally analyzed as often in high school as acoustic levitation of small bodies. This product also serves as a didactic tool for high school teachers, especially for public school teachers. A small historical introduction to acoustic levitation, a theoretical explanation of acoustic levitation, the procedures for the assembly of the low cost ultrasonic acoustic mini levitator and a lesson plan with an investigative methodology consisting of a research demonstration were made. The elaborate educational product shows to be fully feasible for application in a high school classroom, mainly in public schools, due to its innovation, ease and low cost.

Keywords: Teaching. Physical. Acoustic Levitation.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	UM BREVE HISTÓRICO DA FORÇA DE RADIAÇÃO ACÚSTICA	13
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA LEVITAÇÃO ACÚSTICA	20
3.1.	LEVITADOR ACÚSTICO RESSONANTE	20
3.2.	LEVITADOR ACÚSTICO NÃO RESSONANTE	25
4.	PROCEDIMENTOS DE MONTAGEM	27
5.	APLICAÇÃO METODOLÓGICA DO PRODUTO EDUCACIONAL	33
5.1.	O ENSINO POR INVESTIGAÇÃO	33
5.2.	DEMONSTRAÇÃO INVESTIGATIVA	34
5.3.	PLANO DE AULA	35
6.	CONCLUSÃO	37
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

1. INTRODUÇÃO

Desde a Antiguidade já se tinha um interesse peculiar no que se refere aos fenômenos físicos que envolvessem ondas e isso foi mais preciso na antiga Civilização Grega na qual alguns filósofos gregos como Heron de Alexandria investigavam sobre fenômenos ondulatórios. Ao passar das eras a Acústica foi se tornando uma das áreas mais importantes da Física, pois essa apresenta diversas aplicações tecnológicas que são úteis e cruciais para a nossa sociedade em variados campos do conhecimento, por exemplo, na Medicina e na Arquitetura (MONTEIRO JUNIOR; CARVALHO, 2011). Uma dessas tecnologias que tiveram origem nos estudos dos fenômenos acústicos foi o levitador ultrassônico que através dele é possível à levitação de pequenos objetos para a análise laboratórios de produtos e para pesquisa acadêmica de várias áreas do conhecimento (WHYMARK, 1975).

Ao prestarmos atenção da forma que o ensino da Acústica no Ensino Médio, principalmente em escolas públicas, é lecionado se pode notar que essa área da Física ainda possui numerosos desafios didáticos, porque os alunos não se sentem motivados e parte disso se deve à forma tradicional de ensino que são adotados por professores que frequentemente não conseguem fazer uma conexão de forma eficaz entre o ensino feito na sala de aula e os fenômenos que acontecem no cotidiano dos alunos (THOMAZ, 2000).

Por consequência, é notório o desinteresse por parte dos alunos do Ensino Médio pelo o estudo da Acústica. Logo, tendo em vista tal problemática foi proposta a criação de um minilevitador acústico ultrassônico de baixo custo cujos componentes são uma placa nano-arduíno conectada a um computador, um sensor ultrassônico, dois jumpers e um cabo USB. Através desse experimento é possível levitar pequenos objetos como bolinhas de isopor, pequenos componentes eletrônicos e insetos. A força de radiação acústica do levitador se anula com a força gravitacional dos pequenos objetos citados e com isso, tais corpos levitam nos nós da onda estacionária resultante produzida pelo transdutor ultrassônico (ANDRADE; PÉREZ; ADAMOWSKI, 2015).

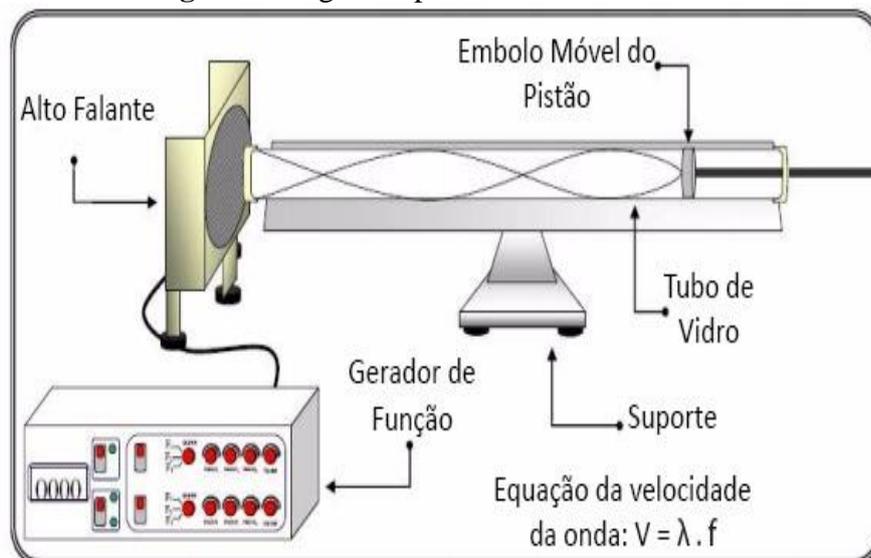
Essa alternativa experimental relativamente barata tem como objetivo mostrar de forma qualitativa, clara e concisa o fenômeno da levitação acústica. Além disso, essa proposta pode ser aplicada no ensino médio e pode ser trabalhada utilizando-se o método de ensino por investigação.

Para uma melhor compreensão esta monografia foi organizada da seguinte forma: no capítulo 2 foi feita uma pequena história da força de pressão acústica; no capítulo 3 foi discutida a fundamentação teórica da levitação acústica; no capítulo 4 foram descritos os procedimentos de montagem do minilevitador acústico ultrassônico de baixo custo; no capítulo 5 foi explicado como aplicar metodologicamente esse produto educacional no ensino médio; no capítulo 6 foi feita a conclusão deste trabalho e finalmente no capítulo 7 foram feitas as referências bibliográficas.

2. UM BREVE HISTÓRICO DA FORÇA DE RADIAÇÃO ACÚSTICA

Historicamente em 1866 foi possível observar o efeito da força de radiação acústica através do Tubo de Kundt. Os componentes desse experimento foram um tubo de vidro com ar, partículas de talco, um alto-falante e um gerador de energia. Com isso, era possível mostrar que através das ondas estacionárias longitudinais produzidas pelo alto-falante às partículas de talco se moviam em direção aos nós de pressão das ondas estacionárias. O objetivo desse experimento era medir a velocidade do som através da distância entre os nós de pressão e a frequência de onda ajustada pelo gerador de energia (SAAB; CÁSSARO; BRINATTI, 2005). Esse experimento está ilustrado na figura 1.

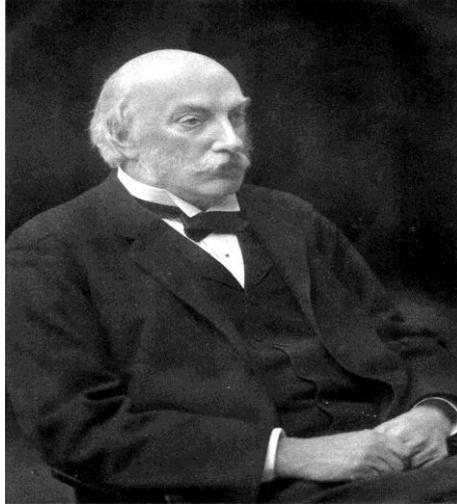
Figura 1. Figura explicativa do Tudo de Kundt.



Fonte: <http://tubodekundt2017.blogspot.com.br/>. Acessado em 20/01/2018.

Um dos primeiros cientistas a estudar a força de radiação acústica foi John William Strutt, Barão Rayleigh. Em 1877 o físico e professor John William Strutt publicou um livro cujo título é "A Teoria do Som" essa obra descreve de forma elegante a origem e a propagação das ondas sonoras em uma época que se acreditava no éter. Barão Rayleigh em seus trabalhos científicos supôs que ondas sonoras assim como as ondas eletromagnéticas exercem uma força sobre os corpos e também que o som se propaga através do ar (STRUTT, 1877). Na figura 2 temos tal mente brilhante.

Figura 2. Foto do Barão Rayleigh.



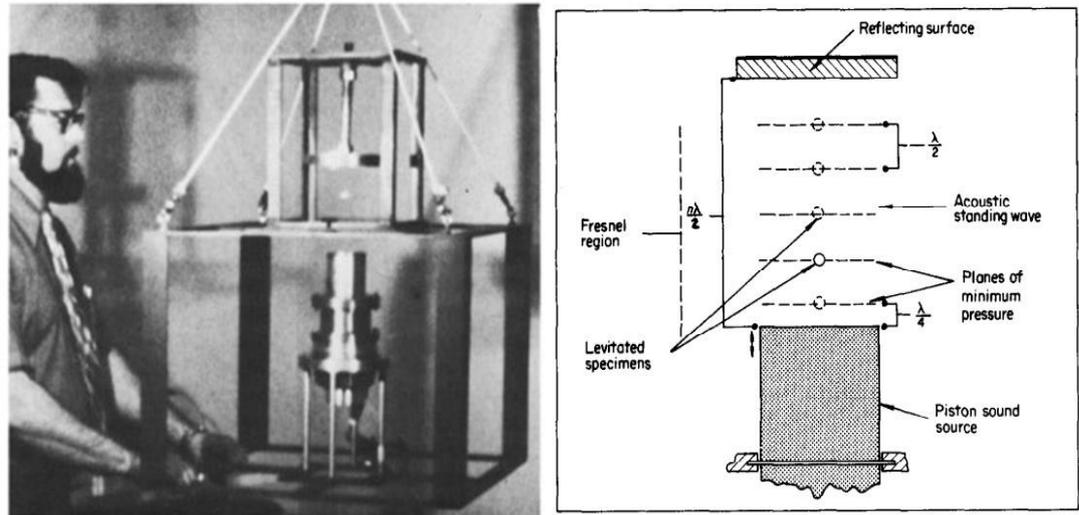
Fonte: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/28/John_William_Strutt.jpg Acessado em 20/01/2018.

Em 1903 um cientista chamado Altberg mensurou com precisão a força de pressão acústica das ondas sonoras (ALTBURG, 1903, apud TORR, 1984). Após isso, outro cientista que veio a se destacar foi Louis V. King em 1934 que calculou a força de radiação acústica em uma esfera incompressível através de ondas estacionárias (KING, 1934). Já em 1962 um pesquisador chamado Lev Gor'kov desenvolveu um método para calcular o potencial acústico que atua numa pequena esfera em um campo acústico estacionário arbitrário (GOR'KOV, 1962).

O ano de 1975 também teve uma grande novidade, pois é nesse ano que temos um levitador acústico moderno onde foi possível levitar e posicionar líquidos e materiais densos sólidos de tamanhos úteis em experimentos de processamento espacial. A patente desse trabalho foi concedida ao Centro de Voo Espacial Marshall. Basicamente, esse levitador acústico é formado por uma fonte de som que consiste em um pistão circular plano que irradia um feixe de som em direção a uma superfície refletora paralela a uma distância que seja um múltiplo inteiro de meio comprimento da onda estacionária. A frequência que essa fonte de som emite é de 20 kHz (WHYMARK, 1975).

O método pode ser dimensionado para um processo de fabricação de espaço em escala total. A virtude da simplicidade é mantida no levitador, enquanto opera em ambientes de alta temperatura superiores a 1000°C (WHYMARK, 1975). Temos na figura 3 esse experimento que marcou a modernização e fama da levitação acústica.

Figura 3. Foto do levitador acústico do Whymark em 1975.



Fonte: Whymark 1975.

Depois disso, em 1984 dois cientistas chamados Martin B. Barmatz e Peter Collas utilizaram o método de Gor'kov para determinar o potencial acústico que atua numa esfera em campos estacionários com geometria retangular, cilíndrica e esférica (BARMATZ; COLLAS, 1984). Em 1987, a NASA (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço) projetou uma câmara de levitação acústica com o propósito de estudar a micro gravidade.

Essa câmara consiste em um cubo de 12 polegadas de Plexiglas cuja função é ser uma cavidade ressonante de Helmholtz usando três alto-falantes embutidos nela. Abaixo temos a imagem desse projeto.

Figura 4. Câmara de levitação acústica da NASA.

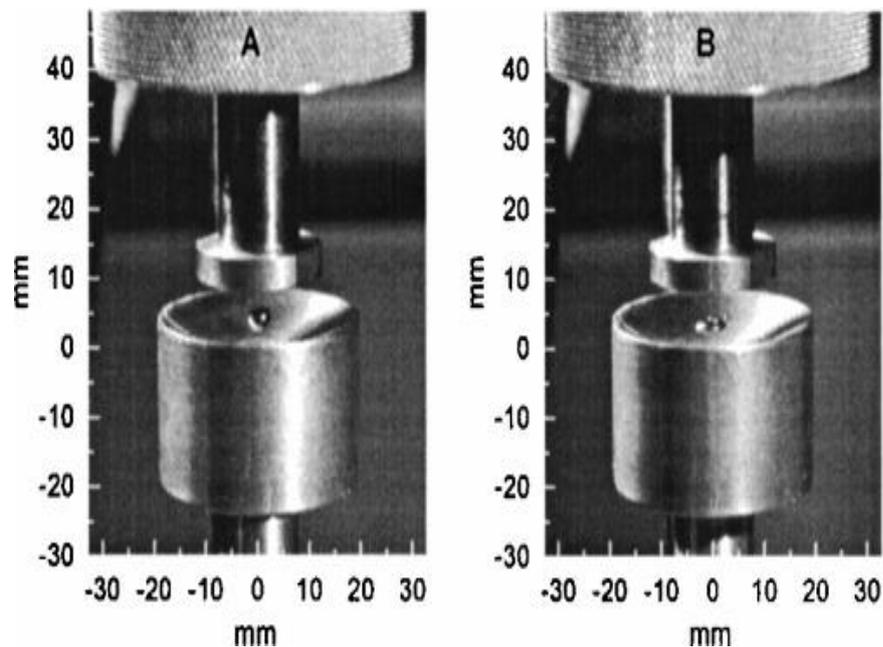


Fonte: https://www.youtube.com/watch?v=vv682LasZ_g. Acessado em 20/01/2018.

O cientista Junru Wu construiu um grampo acústico em 1991 em um meio líquido (água destilada). A amostra foi controlada variando a frequência ou a separação e a posição dos transdutores. Esse foi exposto com ovos de rã e partículas de látex (WU,1991).

Em 1992, Cao Zhuyou e coautores desenvolveram um levitador acústico com três graus de liberdade (ZHUYOU et al., 1992). Mais tarde em 2002, o físico Wen-Jie Xie e coautores desenvolveram um levitador acústico capaz de levitar pequenas esferas de mercúrio no estado líquido e de irídio no estado sólido (XIE et al., 2002). Na figura 5, temos a imagem de tal levitador acústico.

Figura 5. Levitador acústico dos físicos Xie e coautores em 2002.

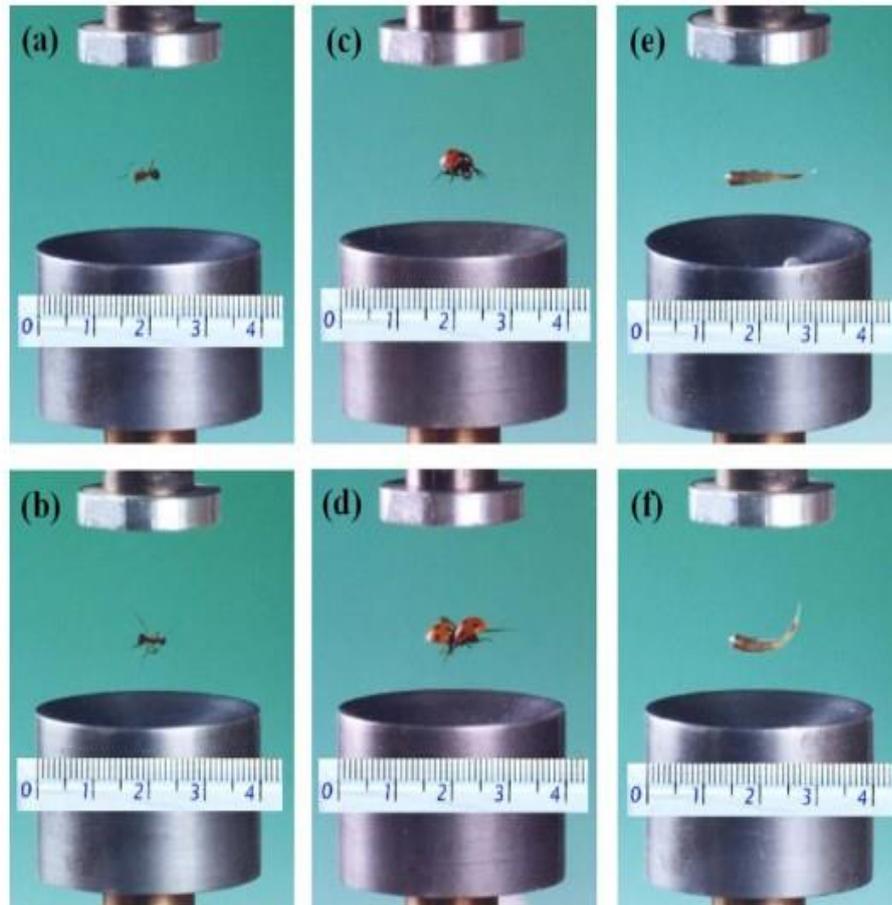


Fonte: Xie et al., 2002.

Lee fez um estudo teórico em 2005 sobre a viabilidade de usar raios acústicos ultrassônicos para construir pinças acústicas com o objetivo de manipular macromoléculas e células cujo tamanho sejam da ordem dos microns (LEE, 2005). Já em 2006 Wen-Jie Xie e coautores desenvolveram outro levitador, mas agora capaz de levitar pequenos insetos, como formigas e joaninhas, pequenos peixes (XIE et al., 2006).

Nesse artigo feito por Xie e coautores foi concluído que a vitalidade da formiga e da joaninha não são evidentemente influenciadas durante a elevação acústica, enquanto que a do peixe é reduzida devido à inadaptação do abastecimento de água.

Figura 6. Levitador acústico dos físicos Xie e Wei em 2006.

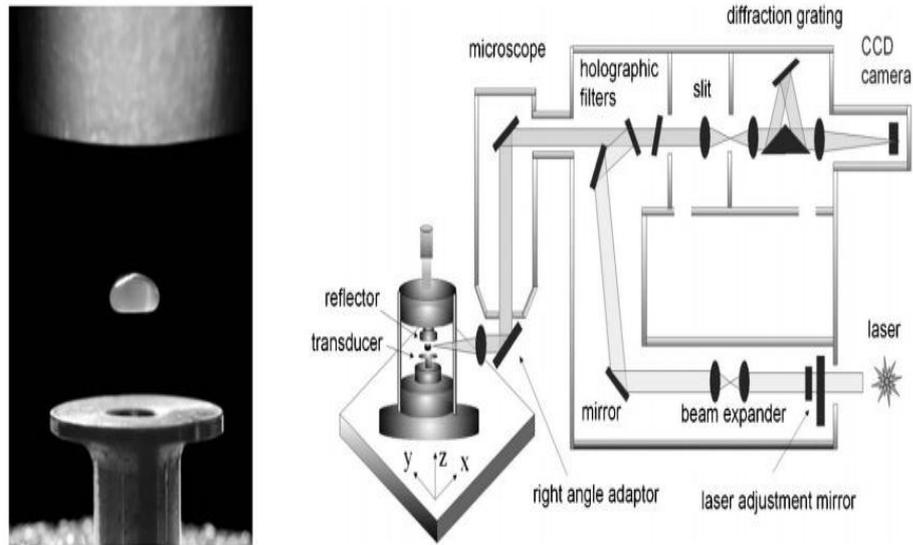


Fonte: Xie et al., 2006.

Em 2007, o cientista Ljiljana Puskar e coautores criaram uma técnica de levitação acústica que foi usada pela primeira vez para análise de gotas de espectroscopia Raman. Para isso, foi feito um acoplamento de um dispositivo de levitação acústica com um espectrômetro Micro Raman que forneceu uma sonda molecular direta de química celular em um ambiente sem recipiente minimizando a atenuação do sinal e eliminando os efeitos de adesão às paredes e interfaces (PUSKAR et al., 2007).

Esse trabalho teve excelentes resultados experimentais, com isso, comprovando que a combinação da levitação acústica com a espectroscopia Raman é altamente eficaz para análises de diagnósticos de células de animais vivas. Na figura 7, temos uma foto desse levitador acústico com o esquema experimental de todo o dispositivo (PUSKAR et al., 2007).

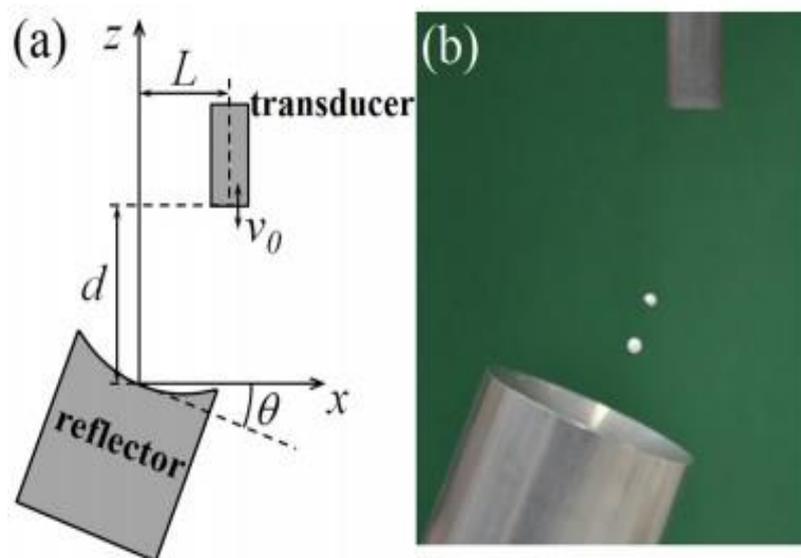
Figura 7. Levitador acústico acoplado com um espectrômetro Micro Raman.



Fonte: Puskar et al.,2007.

Em 2015, pesquisadores brasileiros demonstram que partículas que levitam através de um levitador acústico podem ser manipuladas controlando a posição do refletor enquanto mantém o transdutor em uma posição fixa. Na figura 8, temos uma foto que ilustra tal trabalho (ANDRADE et al., 2015).

Figura 8. Levitador acústico do cientista Andrade e coautores.



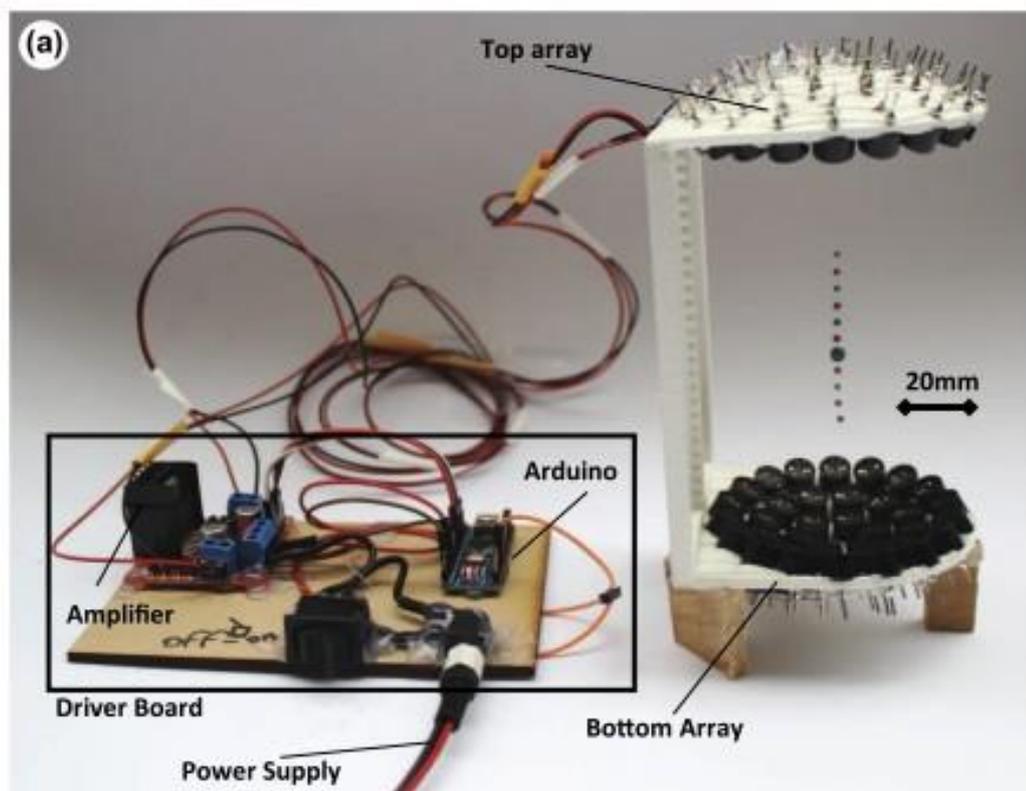
Fonte: Andrade et al.,2007.

Uma das maiores publicações científica sobre levitação acústica foi feita em 2017 pelo pesquisador Asier Marzo da universidade de Bristol localizada no Reino Unido. Ele construiu um levitador acústico de pequeno porte. Os principais componentes eletrônicos desse projeto foram 72 sensores ultrassônicos, uma placa *nanoarduino*, um amplificador, uma *driver board* e uma base projetada em uma impressora 3D. Mesmo tendo vários componentes esse levitador é considerado barato e totalmente viável para a utilização de experiências envolvendo levitação acústica em comparação aos levitadores feitos em grandes laboratórios (MARZO et al., 2017).

Através dele, foi possível levantar gotas de água, açúcar e sílica e também objetos sólidos como grãos de areia, esfera de safira e peças cerâmicas. Esse levitador acústico chama atenção no que tange à aplicação no ensino da Acústica, pois ele é uma forma mais barata de se construir um levitador acústico (MARZO et al., 2017).

Com isso, esse levitador acústico é totalmente viável para o uso de experimentos no Ensino Médio ou Superior. Além disso, esse projeto pode ser usado como produto educacional ou servir de inspiração para outros produtos educacionais na área da Física. Na figura 9, temos uma foto de tal levitador acústico.

Figura 9. Levitador acústico do cientista Asier Marzo



Fonte: Marzo et al., 2017.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA LEVITAÇÃO ACÚSTICA

A levitação acústica ocorre em um corpo devido à força de pressão acústica na qual é produzida por uma onda estacionária ou ondas progressivas (WANG e LEE, 1998). Conseqüentemente, para se levitar um corpo em queda livre através da força de pressão acústica basta que essa tenha a mesma intensidade e direção oposta à força gravitacional que age em tal corpo (ANDRADE et al.,2015). Os levitadores acústicos podem ser classificados como ressonantes e não ressonantes (ANDRADE et al., 2015).

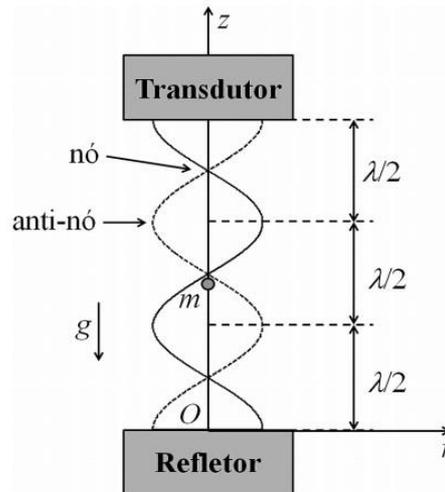
A principal característica dos levitadores acústicos ressonantes é que a distância entre o transdutor e o refletor é fixa. Essa distância deve ser um múltiplo inteiro de meio comprimento da onda estacionária. Tendo-se em que a distância entre o emissor de ondas e o refletor é um múltiplo inteiro de meio comprimento da onda estacionária e esta é fixa, conseqüentemente, se terá sempre para os levitadores acústicos ressonantes a condição de ressonância. Já para os levitadores acústicos não ressonantes a distância não é fixa, com isso a condição de ressonância não é necessária (ANDRADE et al., 2015).

Além disso, ao mudarmos a distância entre o transdutor e o refletor o número de nós da onda estacionária muda, o que pode permitir a levitação de várias partículas simultaneamente. Outro diferencial nesse tipo de levitação acústica é a liberdade em movimentar o refletor em relação ao transdutor para manipular partícula (s), o que não é possível no caso da levitação acústica ressonante (ANDRADE et al., 2015).

3.1. LEVITADOR ACÚSTICO RESSONANTE

Uma das formas de se levitar um corpo usando a levitação acústica ressonante é introduzi-lo em uma cavidade acústica fechada em ambos os lados cujo comprimento do tubo seja múltiplo de meio comprimento da onda estacionária. Nessa mesma cavidade acústica também é necessário se ter um transdutor que irá emitir ondas sonoras e um refletor. De posse desse dispositivo, teremos que o som será emitido, e quando chegar ao refletor será refletido, com isso teremos uma onda estacionária longitudinal no eixo Z (ANDRADE et al. 2015). Para entender melhor esse levitador unidimensional, a figura 10 ilustra.

Figura 10. Representação de um levitador acústica de um único eixo.



Fonte: Andrade et al.,2015.

Segundo ANDRADE et al. (2014), a equação de pressão acústica emitida por um levitador acústico ressonante é da seguinte forma:

$$p(z, t) = A \cos(\omega t) \cos(kz) \quad (3.1)$$

, onde ω é a frequência angular, k é o número de onda, A é amplitude de pressão da onda e z é a posição axial. Segundo ANDRADE et al. (2014), de posse da equação 3.1 é possível descobrir a função velocidade da partícula u por meio da equação de Euler Linearizada:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla p \quad (3.2)$$

, onde ρ é a densidade do meio. Com isso, ao substituirmos na equação 3.2 a equação 3.1, teremos uma expressão para a velocidade da seguinte forma:

$$u_z(z, t) = \frac{A}{\rho c} \text{sen}(\omega t) \text{sen}(kz) \quad (3.3)$$

Onde c é a velocidade propagação da onda. Segundo a Teoria de Gor'kov, podemos calcular a força de radiação acústica a partir do potencial U (GOR'KOV, 1962). Para isso, é preciso considerar que o corpo que iremos levitar seja uma esfera perfeita que tenha um raio R no qual é muito menor do que o comprimento de onda emitido. Também é necessário que a densidade da esfera seja muito maior do que a do fluido ao redor da esfera, e que a compressibilidade da esfera seja muito menor do que a do fluido (ANDRADE et al.,2015).

Com esses requisitos o potencial U é calculado da seguinte forma:

$$U = 2\pi R^3 \left[\frac{\langle p^2 \rangle}{3\rho c^2} - \frac{\rho \langle u^2 \rangle}{2} \right] \quad (3.4)$$

, onde $\langle p^2 \rangle$ e $\langle u^2 \rangle$ são as médias temporais da pressão e da velocidade, respectivamente. Por meio dessa relação matemática, podemos determinar as regiões nas quais o potencial acústico é mínimo e estável para levitar o corpo, ou seja, podemos determinar as posições dos nós de levitação.

Através da equação 3.4 podemos calcular a força de pressão acústica a partir da seguinte equação:

$$\mathbf{F} = -\nabla U \quad (3.5)$$

Perceba que é necessário calcular as médias temporais da pressão e da velocidade para inserimos essas variáveis no potencial da força de radiação acústica. Com isso, Segundo ANDRADE et al. (2014), teremos:

$$\langle p^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T [A \cos(\omega t) \cos(kz)]^2 dt = \frac{1}{2} [A \cos(kz)]^2 \quad (3.6)$$

$$\langle u^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T u_z^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{A}{\rho c} \sin(\omega t) \sin(kz) \right]^2 dt = \frac{1}{2} \left[\frac{A}{\rho c} \sin(kz) \right]^2 \quad (3.7)$$

Segundo ANDRADE et al. (2014), ao fazermos a substituição das equações 3.6 e 3.7 na equação 3.4, teremos o seguinte resultado:

$$U = \frac{\pi R^3 A^2}{\rho c^2} \left[\frac{\cos^2(kz)}{3} - \frac{\sin^2(kz)}{2} \right] \quad (3.8)$$

Agora, ao aplicarmos a equação 3.8 na equação 3.5, calcularemos a força de radiação acústica:

$$F_z = -\frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{5\pi R^3 A^2 k}{6\rho c^2} \sin(2kz) \quad (3.9)$$

Caso sejam utilizadas ondas progressivas, teremos que a pressão pode ser calculada da seguinte forma:

$$p_i = Ae^{i(kz - \omega t)} \quad (3.10)$$

Com isso, a magnitude da força de radiação acústica segundo WANG et al. (1998) para esse segundo caso é:

$$F_z = \frac{11\pi R^6 A^2 k^4}{18\rho c^2} \quad (3.11)$$

Podemos observar que a magnitude da força de radiação acústica produzida por ondas estacionárias é superior por uma ordem de (kR^3) que a força de radiação acústica produzida por ondas progressivas. É por isso que a maioria dos levitadores acústicos se usa as ondas estacionárias. Além disso, podemos perceber que a força de radiação acústica produzida por ondas estacionárias é uma força restauradora que empurra a partícula para a posição de equilíbrio.

Agora, ao analisarmos a força-peso que atua em uma partícula temos que essa força é calculada da seguinte forma:

$$F_g = mg \quad (3.12)$$

Onde m é a massa do corpo e g é a gravidade.

Sabemos que a massa pode ser calculada usando-se a densidade volumétrica e o volume da partícula levando em consideração que a partícula seja uma esfera perfeita, da seguinte forma:

$$m = \rho_{esfera} \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (3.13)$$

Onde ρ_{esfera} é a densidade volumétrica do corpo e R é o raio da partícula.

Assim, teremos que:

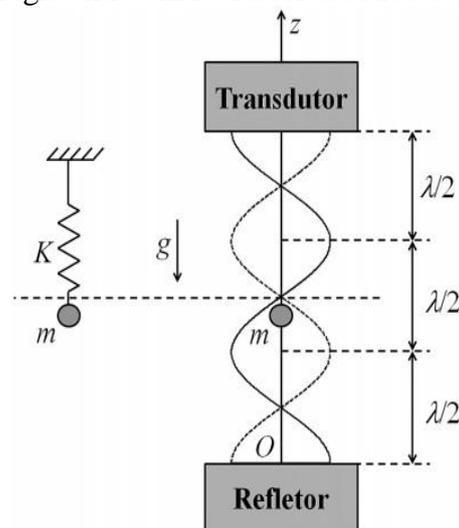
$$F_g = \rho_{esfera} \frac{4}{3} \pi R^3 g \quad (3.14)$$

Segundo ANDRADE et al. (2015), levando-se em conta que a força de empuxo seja desprezível e levado em conta as equações (3.9) e (3.14), temos que para calcular a amplitude de pressão mínima (A_{min}):

$$\frac{5\pi R^3 A_{min}^2 k}{6\rho c^2} \geq \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_{esfera} g \therefore A_{min} \geq \sqrt{\frac{8\rho_{esfera}\rho c^2 g}{5k}} \quad (3.15)$$

Se quisermos levitar uma esfera de densidade de 1000 kg/m^3 através de um levitador acústico que opera numa frequência de 20 kHz no ar em condições ambiente a amplitude mínima de pressão seria em cerca de 160 dB. Essa intensidade sonora é maior que a intensidade sonora produzida por uma turbina de avião. Por isso, é recomendável que os levitadores acústicos funcionem com frequências maiores que o limite audível, ou seja, acima de 20 kHz. É possível fazermos uma analogia entre a levitação acústica e um sistema massa-mola, pois a força de radiação acústica e a força elástica são forças restauradoras que empurram os corpos para a posição de equilíbrio (ANDRADE et al.,2015). Na figura 11, temos uma figura para melhor entender como essa analogia acontece.

Figura 11. Representação da analogia entre um levitador acústico e um sistema massa-mola.



Fonte: Andrade et al.,2014.

Com isso, é possível associar uma constante elástica K para pequenos deslocamentos em torno da posição de equilíbrio. Logo, segundo ANDRADE et al. (2015), matematicamente teremos:

$$K = \frac{5\pi R^3 A^2 k^2}{3\rho c^2} \quad (3.16)$$

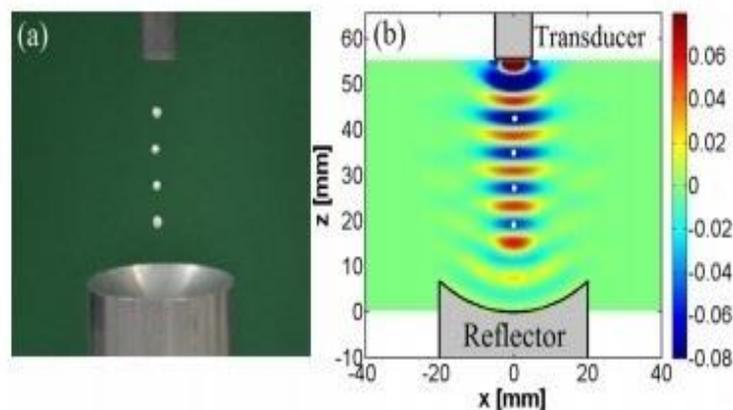
Além disso, temos que uma partícula ao ser levitada através da força de radiação acústica não ficará exatamente no nó de pressão da onda estacionária, mas sim em uma posição ligeiramente abaixo do nó de pressão. Isso acontece devido à força gravitacional.

3.2. LEVITADOR ACÚSTICO NÃO RESSONANTE

No que se refere aos levitadores acústicos não ressonantes, vimos anteriormente que esse tipo de levitador não precisa ter a condição de ressonância. Isso faz com que esse levitador seja mais prático, pois não precisamos manter a distância fixa e precisa entre o emissor e o refletor. O comportamento para um levitador acústico não ressonante é previsto numericamente aplicando um modelo numérico para calcular a distribuição da pressão acústica e a teoria de Gor'kov para obter o potencial da força de radiação acústica que atua sobre uma partícula levitada (ANDRADE et al.,2015).

Após isso, esse modelo numérico é comparado com resultados experimentais para uma melhor análise e interpretação do funcionamento do mesmo. Por meio dos levitadores acústicos não ressonantes é possível controlar as posições das partículas que levitam controlando a posição do refletor enquanto a posição do transdutor esteja fixada. Na figura 12, temos a levitação acústica de partículas de poliestireno expandido e o potencial de Gor'kov adimensional para um sistema de levitação acústica não ressonante (ANDRADE et al.,2015).

Figura 12. Imagem de um levitador acústico não ressonante ao lado do seu potencial de Gor'kov adimensional.



Fonte: Andrade et al.,2015.

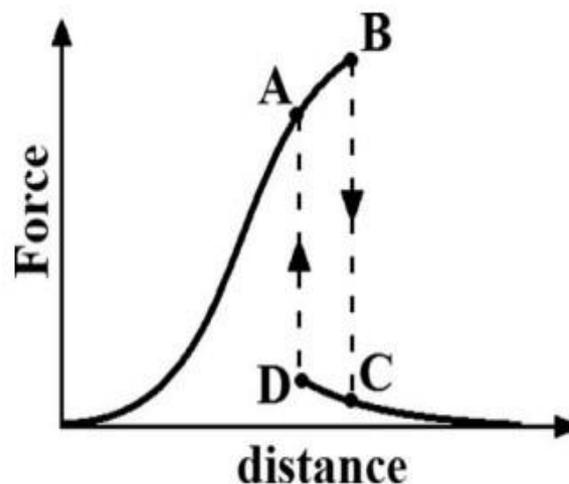
Nos levitadores acústicos não ressonantes são observados fenômenos que não acontecem nos levitadores acústicos ressonantes, como o fenômeno do salto, a geração harmônica e o efeito de histerese. O fenômeno do salto pode ser entendido como uma queda ou como um aumento muito rápido da força de radiação acústica. Isso é causado graças a um pequeno incremento na distância entre o transdutor e o refletor ou de uma aproximação, diminuindo a distância no sistema acústico, com isso, levando a força de uma força mínima até uma força muito maior rapidamente (ANDRADE et al.,2015).

No que se refere à geração harmônica, isso é causado devido à mudança da distância entre o transdutor e o refletor. Logo, quanto maior a distância entre o transdutor e o refletor, maior será o número de harmônicos.

No que tange ao efeito histerese, esse fenômeno é interpretado como uma retardação transitória. Através disso, temos que o sistema acústico possui respostas diferentes ao efeito da força de radiação acústica sobre a face de um refletor no deslocamento do transdutor, deslocamento que pode ser aproximando ou afastando o transdutor do refletor (ANDRADE et al.,2015).

Abaixo temos um gráfico da força versus distância que mostra como ocorre o efeito histerese e o fenômeno do salto na levitação acústica.

Figura 13. Gráfico da força de radiação acústica versus distância.



Fonte: Andrade et al.,2015.

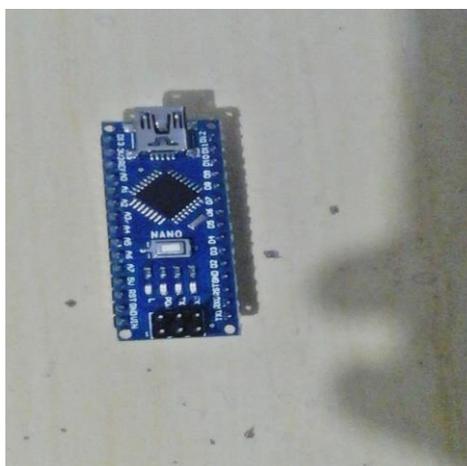
4. PROCEDIMENTOS DE MONTAGEM

Neste capítulo iremos descrever a montagem do levitador acústico de baixo custo proposto. Esse produto educacional foi baseado em um levitador acústico feito por Asier Marzo (MARZO et al.,2017). Com isso, também vamos nomear todos os componentes e levantar uma média de custo para esse produto educacional.

A Lista de componentes eletrônicos necessários para a montagem do levitador acústico de baixo custo:

- Micro controlador *arduino nano* (Fig. 14);
- Cabo USB (Fig.15);
- Fios *jumpers* macho-fêmea e fêmea-fêmea (Fig. 16);
- Dois transdutores ultrassônicos de 40 kHz (Fig17).;
- Pequenos pedaços de isopor (Fig.18);
- Uma grade de plástico (Fig.19);
- Uma fita adesiva;

Figura 14. Um Micro controlador *arduino nano*.



Fonte: Autoral.

Figura 15. Um cabo USB.



Fonte: Autoral.

Figura 16. Pacotes com fios *jumper*s macho-fêmea e fêmea-fêmea.



Fonte: Autoral.

Figura 17. Dois transdutores ultrassônicos de 40 kHz.



Fonte: Autoral.

Figura 18. Pequenos pedaços de isopor.



Fonte: Autoral.

Figura 19. Grade de plástico.



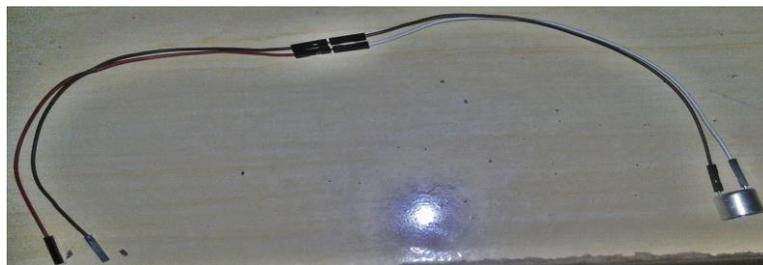
Fonte: Autoral.

Tais componentes eletrônicos citados devem ser preparados e combinados da seguinte maneira;

-1º Passo: conectar os fios *jumpers* macho-fêmeas com os fios *jumpers* fêmea-fêmea.

-2º Passo: conectar os fios *jumpers* nas entradas dos transdutores ultrassônicos. Conforme mostra a figura 20.

Figura 20. Fio jumper conectado nas entradas transdutor ultrassônico.

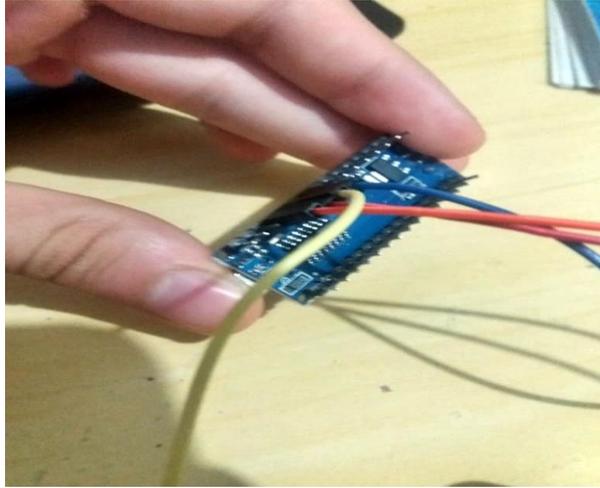


Fonte: Autoral.

-3º Passo: conectar nos canais A0 e A1 do micro controlador *arduino nano* um dos conjuntos de fios *jumpers* e transdutor.

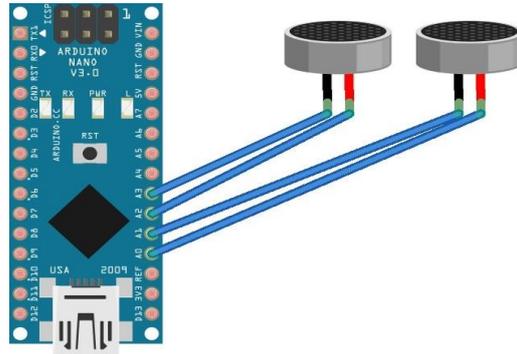
-4º Passo: conectar os canais A2 e A3 do micro controlador *arduino nano* o outro conjunto de fios *jumpers* e transdutor. Conforme mostra nas figuras 21 e 22.

Figura 21. Conjunto de fios jumpers e transdutores ultrassônicos conectados à placa *arduino nano*.



Fonte: Autoral.

Figura 22. Esquema de montagem.



Fonte: Autoral.

-5º Passo: conectar ao conjunto anterior o cabo USB. Conforme mostra a figura 23.

Figura 23. Minilevitador acústico de baixo custo.



Fonte: Autoral.

-6º Passo: instalar em um computador o software Arduino.

-7º Passo: Programar utilizando o ambiente de desenvolvimento Integrado da plataforma *Arduino, IDE (Integrated Development Environment)*. O código está demonstrado na figura 24. Outra opção é fazer o *download* do arquivo do código no *site*: <https://github.com/gbarbarov/NanoLev>.

Figura 24. Algoritmo para a programação no *arduino*.

```
ALGORITMO NANO_LEV.INO
boolean toggle0 = 0;
void setup(){
  DDRC = 0b00001111;
  PORTC = 0b00000000;
  cli();|
  //set timer2 interrupt at 80kHz
  TCCR2A = 0;
  TCCR2B = 0;
  TCNT2 = 0;
  OCR2A = 24;
  TCCR2A |= (1 << WGM21);
  TCCR2B |= (1 << CS21);
  TIMSK2 |= (1 << OCIE2A);
  sei();
}
ISR(TIMER2_COMPA_vect){
  if (toggle0){
    PORTC=0x05;
    toggle0 = 0;
  }
  else{
    PORTC=0x0A;
    toggle0 = 1;
  }
}
void loop(){
}
```

Fonte: Gerardo Barbarov Rostán

-8º Passo: conectar o cabo USB em um *notebook* ou *desktop*.

-9º Passo: rodar o código NANO_LEV.INO no *software Arduino*.

-10º Passo: posicionar uma pequena bola de isopor de forma perpendicular ou aproximadamente perpendicular ao transdutor acústico cerca de alguns centímetros. Conforme mostra a figura 25. Para auxiliar o procedimento recomenda-se o uso da grade de plástico para colocar a bolinha de isopor e também um pedaço de fita adesiva para colar um dos transdutores afim de que um deles esteja fixado.

Figura 25. Levitação acústica de uma pequena bola de isopor.



Fonte: Autoral.

Outra forma de levitação acústica utilizando-se do equipamento acima consiste em usar apenas um transdutor acústico ultrassônico. Para isso, basta aproximar um dos transdutores a uma bolinha isopor na qual esteja apoiada em uma mesa. A distância entre o transdutor e a bolinha deve ser por volta de 1 centímetro e de no máximo 1,5 centímetros. Dessa forma, pode-se observar a levitação acústica da bolinha, mas com menor potência acústica que o método anterior. Caso o computador por algum motivo não reconheça o cabo USB, será necessário atualizar o pacote de *drives* do sistema operacional vigente ou fazer o *download* do *drive* FT232R USB UART. Esse citado *drive* pode ser facilmente encontrado na *internet*. O levantamento do custo médio de cada componente e o preço total desse produto educacional são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Custos (em 7/06/2018)

Componentes	Custo médio
Micro controlador <i>arduino nano</i> com cabo USB	R\$ 15,00
Fios <i>jumpers</i> macho-fêmea e fêmea-fêmea	R\$ 8,00
Dois transdutores ultrassônicos de 40 kHz	R\$ 10,00
Pequenos pedaços de isopor	R\$ 0,00
Uma grade de plástico	R\$ 0,00
Fita adesiva	R\$ 3,00
Total:	R\$ 36,00

Fonte: Autoral.

5. APLICAÇÃO METODOLÓGICA DO PRODUTO EDUCACIONAL

Neste capítulo iremos discutir uma metodologia para a aplicação do minilevitador acústico ultrassônico de baixo custo no ensino de física. Esse produto educacional proposto nesta monografia é direcionado para o professor usá-lo em uma sala de aula do ensino médio. Dessa forma, sugerimos que a melhor forma de aplicação metodológica desse produto seja o ensino de investigação onde a atividade investigativa será uma demonstração. Com isso, elaboramos um plano de aula usando a citada metodologia e atividade investigativa. Vale ressaltar que outras metodologias podem ser aplicadas, mas essas muitas vezes passam a serem inviáveis devido ao fator econômico, principalmente, se forem aplicadas em escolas públicas.

5.1. O ENSINO POR INVESTIGAÇÃO

O ensino por investigação é uma forma de desafiar os estudantes na solução de situações problemas. Com isso, esse tipo de abordagem faz com que os alunos possam desenvolver da melhor forma conhecimentos conceituais. Além disso, essa abordagem de ensino faz com que os alunos possam refletir, justificar e aplicar os conhecimentos teóricos adquiridos em novas situações. A investigação feita pelos alunos precisa ser fundamentada para que eles saibam os motivos que levaram a acontecer determinado fenômeno (AZEVEDO, 2006).

Através do ensino por investigação, o discente tem uma nova visão e verdadeira sobre do que se trata por problemas em física, pois devido à abordagem do ensino de física tradicional muitos alunos possui uma visão distorcida de que problemas em física se resumem a exercícios passados pelos os livros nos quais bastam aplicar equações para que se possa ter uma resposta. Assim, eles tratam à física não como ciência, mas como uma mera aplicação da matemática a fim de calcular determinado parâmetro sem nenhum questionamento científico ou teórico.

Tendo-se em vista conseguir o maior interesse dos alunos para se iniciar um ciclo investigativo, os alunos precisam ser estimulados com situações intrigantes (CAMPOS, 1999). Percebemos que a Ciência teve origem nas dúvidas ou questões que desafiaram o raciocínio humano, com isso o ensino de ciências originado na investigação científica deve partir de perguntas feitas na sala de aula para poder instigar nos alunos para que se inicie o tão

esperado ciclo investigativo. A primeira etapa da investigação que acontece é a elaboração de hipóteses na quais são testadas experimentalmente e comparadas entre si.

Depois disso, o professor deve ajudar os alunos no que tange à discussão para que esses não saiam do tema proposto. Finalmente, temos a interpretação dos resultados obtidos pelo os alunos. Todo o processo investigado deve ser gerenciado pelo professor no qual deve confrontar o aluno usando questionamentos e também valorizando as afirmações dos mesmos para que esses possam se sentir bem durante toda a investigação (CAMPOS, 1999).

5.2. DEMONSTRAÇÃO INVESTIGATIVA

Definimos por demonstração investigativa uma demonstração que parta de um problema ou fenômeno que conduza a uma investigação (AZEVEDO, 2006). As atividades cujo objetivo orientam o aluno a participar do processo de formulação de hipóteses e análise de resultados sobre um fenômeno apresentado pelo professor são consideradas investigativas (LEWIN; LOMÁSCOLO, 1998).

Tendo-se como ponto de partida a ilustração do fenômeno apresentado, o docente deve iniciar a formulação de hipóteses com a turma, com o propósito de uma explicação científica para esse problema. Com isso, surgirão por parte dos alunos diversos argumentos nos quais o professor irá organizar e confrontar com as leis e teorias da literatura científica. Percebeu-se que dessa forma os estudantes exercem suas habilidades de argumentação e chegando a uma conclusão a formulação de um conceito envolvido (AZEVEDO, 2006).

É interessante que no momento da argumentação dos alunos o professor evite que as discussões feitas em sala de aula não sejam apenas jogos de competição oratória desprovida de conteúdo entre os alunos. Mas, sim que seja uma construção teórica que descreva com sucesso o fenômeno natural observado.

Tendo-se uma visão mais geral sobre o ensino de física, aulas que se utilizem de demonstrações investigativas experimentais acarretam por consequência muitas contribuições positivas, segundo Azevedo (2006): perceber as concepções espontâneas dos alunos durante a participação destes durante as etapas de resolução de problemas, valorizar o ensino por investigação em sala de aula, aproximar a aula de uma investigação científica, melhorar a participação e a interação do aluno em sala de aula, valorizar a interação do estudante com o fenômeno estudado, valorizar a aprendizagem de atitudes e possibilitar a criação de conflitos cognitivos.

5.3. PLANO DE AULA

OBJETIVOS:

- Compreender e discutir os conceitos de frequência, força de radiação acústica e intensidade acústica;
- Relacionar os conceitos de estática na levitação acústica de corpos;

CONTEÚDO PROGRAMÁTICO:

- Princípios e fundamentos da Acústica;
- Levitação acústica de corpos;
- Estática;

RECURSOS:

- Lousa;
- Pincéis;
- Uma folha A4 por equipe (relatório);
- Um levitador acústico de baixo custo;
- Um computador;

PROCEDIMENTO METODOLÓGICO:

- Organizar e dividir a turma de alunos em grupos;
- Cada grupo deve eleger um líder que irá representar os seus integrantes;
- Apresentar o minilevitador acústico todo montado e acompanhamento das bolinhas de isopor para os alunos;
- Ligar o minilevitador acústico e incidir nas bolinhas de isopor as ondas ultrassônicas de forma perpendicular a uma distância de centímetros. Com isso, inicia-se a demonstração experimental;
- Logo depois, o professor faz as seguintes perguntas para a turma: Ao incidimos de forma perpendicular ondas ultrassônicas em uma bolinha de isopor cuja distância é da ordem de centímetros entre o emissor e a bolinha, percebemos que esse corpo começa a levitar, por que e como isso acontece?

- Ao término da discussão, cada equipe irá fazer um relatório descrevendo e explicando como ocorre o fenômeno físico observado. Após isso, os líderes de cada grupo irão expor aos demais colegas às linhas de raciocínio adotadas para as perguntas feitas em sala de aula.
- Em uma abordagem expositiva, explicar e discutir como acontece a levitação acústica dos corpos dando importância aos novos conceitos acústicos, como força e pressão de radiação acústica para os alunos;
- Citar as principais aplicações tecnológicas da levitação acústica e sua importância para a sociedade.

AVALIAÇÃO:

- Participação e engajamento dos grupos;
- Análise das exposições teóricas feitas por cada líder.

TEMPO PREVISTO PARA AULA:

- 50 minutos

6. CONCLUSÃO

Através deste trabalho, temos como resultado um produto educacional cuja proposta didática é demonstrar de forma investigativa a levitação acústica dos corpos. Podemos afirmar que o objetivo geral foi obtido com sucesso, pois o minilevitador acústico de baixo custo faz com que o interesse em fenômenos físicos, principalmente os fenômenos acústicos, de alunos do ensino médio seja melhorada. Além disso, ele proporciona uma inovação no ensino de Física, pois por meio dele é possível investigar fenômenos acústicos com os alunos e explicar conceitos físicos que normalmente não são abordados no ensino médio, como a força de radiação acústica e a amplitude de pressão acústica. Isso faz com que assuntos mais complexos em Física que normalmente são vistos somente no ensino superior sejam transmitidos com uma maior clareza e facilidade para alunos do nível médio.

No que tange a aplicação metodológica do produto educacional proposto, didaticamente se pode afirmar que ela teve como objetivo principal promover uma discussão positiva entre os grupos e o professor, pois 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 que são feitas por intermédio de um debate com os demais colegas e com o professor. Com isso, o docente passa a ter um papel mais centralizado na orientação dos alunos com o objetivo de guiar o raciocínio científico dos discentes.

Demonstrações investigativas realizadas em sala de aula sobre acústica e demais áreas da Física podem proporcionar aos professores uma melhor percepção de que é possível fazer do ensino algo mais motivador, e da aprendizagem, algo realmente significativo ou expressivo. Assim, o levitador acústico de baixo custo se torna uma ferramenta fundamental e criativa para a aprendizagem da Física sobre ondas sonoras no Ensino Médio. Consequentemente, isso contribui para que os discentes possam conciliar e entender fenômenos sonoros em seu cotidiano.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MONTEIRO JUNIOR, F.N. e CARVALHO, W.L. O ensino de Acústica nos livros didáticos de Física recomendados pelo PNLEM: Análise das ligações entre a Física e o mundo do som e da música, **HOLOS**, vol.1,p.137-154, 2011.
- WHYMARK, R. R. Acoustic field positioning for containerless processing, **Ultrasonics**, vol. 13, n.11, p. 251-261 ,1975.
- THOMAZ, M. F. A experimentação e a formação de professores de ciências: uma reflexão. **Cad. Cat. Ens. Fis.**, v. 17, n. 3: p. 360 – 369, 2000.
- ANDRADE, M. A. B; PÉREZ, N. ; ADAMOWSKI, J. C. Levitação acústica, **Revista Brasileira no Ensino de Física**, vol.37, n.2 p.1-7, 2015.
- SAAB, S. C; CÁSSARO, F. A. M; BRINATTI, A. M. Laboratório caseiro: tubo de ensaio adaptado como tubo de Kundt para medir a velocidade do som no ar, **Cad. Brás. Ens. Fís.**, v. 22, n. 1: p. 112-120, 2005.
- STRUTT, J. W. **Theory of sound**. Vol. 1. ed. 1^a. Londres, Macmillan and Company, 1877.
- TORR, G. R. The acoustic radiation force. **American Journal of Physics**, vol 52 (5), p. 402-408, 1984.
- KING, L. V. On the acoustic radiation pressure on spheres. The Royal Society of London. Series A, **Mathematical and Physical Sciences**. p. 212-240, 1934.
- GOR'KOV, L. P., On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid, **Soviet Physics - Doklady**, vol. 6, p. 773-775, 1962.
- BARMATZ, M.; COLLAS, P. Acoustic radiation potential on a sphere in plane, cylindrical, and spherical standing wave fields. **Journal of the Acoustic Society America**, vol. 3, n.77, p. 928-945, 1985.
- WU, J. Acoustical tweezers. **J. Acoust. Soc. Am.**, vol. 89, n. 5, p. 2140-2143, 1991.
- ZHUYOU, C.; SHUQIN, L.; ZHIMIN, L.; MINGLI, G.; YULONG, M.; CHENGHAO, W. Development of an acoustic levitation reactor. **Powder Technology**, vol. 69, n. 2, p.125–131, 1992.
- XIE, W.J.; CAO, C. D.; LÜ, Y. J.; WEI, B. Levitation of iridium and liquid mercury by ultrasound. **Physical Review Letters**, vol. 89, n.10, p. 1-4, 2002.
- LEE, J.; HA, K.; SHUNG, K. A theoretical study of the feasibility of acoustical tweezers: Ray acoustics approach. **J. Acoust. Soc. Am.**, vol. 117(5), p. 3273–3280, 2005.
- XIE, W.J.; CAO, C. D.; LÜ, Y. J.; HONG, Y.; WEI, B. Acoustic method for levitation of small living animals. **Applied Physics Letters**, vol.89(214102), p. 1-3, 2006.

PUSKAR, L; TUCKERMANN, R.; FROSCH, T.; POPP, J.; VANALYSA, L; MCNAUGHTON, D.; WOOD, B. R. Raman acoustic levitation spectroscopy of red blood cells and *Plasmodium falciparum* trophozoites, **The Royal Society of Chemistry**, vol. 7, n.9, p. 1125-1131, 2007.

ANDRADE, M, A B., PEREZ, N., ADAMOWSKI, J, C., Particle manipulation by a non-resonant acoustic levitator. **Applied Physics Letters**, vol. 106, 014101, 2015.

WANG, T. G.; LEE, C. P. **Nonlinear Acoustics**, ed. 1, Nova York, Academic Press, 1998.

MARZO, A.; BARNES, A.; DRINKWATER, B. W. Realization of compact tractor beams using acoustic delay-lines. **Applied Physics Letters**, vol 110, p. 014102, 2017.

AZEVEDO, M.C.P.S. **Ensino por investigação: problematizando as atividades em sala de aula. Ensino de ciências: unindo a pesquisa e a prática.** Anna Maria Pessoa de Carvalho (Org). São Paulo. Thomson, 2006.

CAMPOS, M. M. A Formação de professores para crianças de 0 a 10 anos: modelos em debate. **Educação & Sociedade**, v.20, n.68, p.126-142, dez. 1999. (Número especial: Formação de profissionais da educação: políticas e tendências.).

LEWIN, A. M. F e LOMÁSCOLO, T. M. M. La metodologia científica em lá construcción de conocimientos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v.20, n.2, p.147-154. 1998.