

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA-CAMPUS PATOS DE MINAS
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES**

HUDSON SAMUEL CASTRO TEIXEIRA

**Desenvolvimento de um Sistema de Levitação Acústica Controlado por
Microcontrolador**

**PATOS DE MINAS-MG
2025**

HUDSON SAMUEL CASTRO TEIXEIRA

Desenvolvimento de um Sistema de Levitação Acústica Microcontrolado

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora como requisito parcial de avaliação da disciplina de Projeto Final de Curso II, da graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, *Campus Patos de Minas*.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Costa Ramos.

PATOS DE MINAS-MG
2025

HUDSON SAMUEL CASTRO TEIXEIRA

Desenvolvimento de um Sistema de Levitação Acústica Microcontrolado

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora como requisito parcial de avaliação da disciplina de Projeto Final de Curso II, da graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, *Campus Patos de Minas*.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Costa Ramos.

Patos de Minas, 05 de Setembro de 2025

Banca Examinadora

Prof. Dr. Daniel Costa Ramos-FEELT/UFU (Orientador)

Prof. Dr. Júlio Cezar Coelho-FEELT/UFU (Membro 1)

Prof. Dr. Davi Sabbag Roveri-FEELT/UFU (Membro 2)

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Daniel Ramos, que além de orientar este trabalho de conclusão, sempre com muita paciência, desde os primeiros anos do curso foi um professor que levo como exemplo. A todos os Professores que contribuíram para o meu crescimento acadêmico e científico durante a graduação. A todos os amigos da Graduação em Engenharia eletrônica e de Telecomunicações, estes que sempre me ajudaram, incentivaram e estiveram comigo neste período, sem vocês não seria um período tão importante e divertido da minha vida.

Agradeço especialmente a minha família, que estiveram sempre do meu lado diariamente, sempre me incentivando e contribuindo de forma significativa para que eu me tornasse uma pessoa melhor, a companhia de vocês além de ser de suma importância nestes anos, é muito especial também, espero sempre que possível, tê-los por perto. A todos os servidores da Universidade Federal de Uberlândia, campus de Patos de Minas, que foi como uma segunda casa para mim neste período.

Dedico a todos uma frase de Sir Isaac Newton, “Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um protótipo didático de levitação acústica, baseado em ondas ultrassônicas, com o objetivo de demonstrar, de forma acessível e prática, conceitos de ondas estacionárias e ressonância acústica. O sistema foi construído utilizando um microcontrolador Arduino Uno, driver de potência L298N, matriz de transdutores ultrassônicos de 40 kHz, estrutura impressa em 3D e interface homem-máquina composta por display LCD 16×2 e botões de controle. O protótipo permite a manipulação em tempo real dos padrões de excitação acústica, exibindo no LCD informações como *frame* ativo, frequência nominal e índice de amplitude relativa. A montagem modular, de baixo custo e fácil reprodução, garante aplicabilidade em ambientes educacionais e labororiais. Os testes realizados confirmaram a formação de zonas de pressão capazes de sustentar microesferas em levitação estável, validando a proposta como ferramenta didática para ensino de acústica, eletrônica e física aplicada. O sistema demonstrou simplicidade, interatividade e confiabilidade, apresentando-se como alternativa viável para experimentos acadêmicos e futuras melhorias, como medições quantitativas de amplitude e controle automatizado dos padrões de excitação.

Palavras-chave: **Ondas ultrassônicas; Arduino; Protótipo didático; Ensino de Física; Controle eletrônico.**

ABSTRACT

This work presents the development and validation of a didactic acoustic levitation prototype based on ultrasonic waves, aiming to provide an accessible and practical demonstration of standing wave concepts and acoustic resonance. The system was built using an Arduino Uno microcontroller, an L298N power driver, a 40 kHz ultrasonic transducer array, a 3D-printed structure, and a human-machine interface composed of a 16×2 LCD display and control buttons. The prototype allows real-time manipulation of acoustic excitation patterns, displaying on the LCD the active frame, nominal frequency, and relative amplitude index. Its low-cost, modular, and easy-to-replicate design ensures applicability in educational and laboratory environments. Experimental tests confirmed the formation of pressure zones capable of stably levitating microbeads, validating the system as a didactic tool for teaching acoustics, electronics, and applied physics. The prototype demonstrated simplicity, interactivity, and reliability, proving to be a feasible alternative for academic experiments and future improvements such as quantitative amplitude measurements and automated control of excitation patterns.

Keywords: Acoustic levitation; Ultrasonic waves; Arduino; Didactic prototype; Physics education; Electronic control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rastreamento de partículas, com Background de potencial acústico normalizado.	17
Figura 2 - Protótipo de LA.	18
Figura 3 - armadilhas em diferentes posições combinando uma assinatura holográfica.....	19
Figura 4 - Demonstração do efeito piezoelétrico.....	20
Figura 5 - Efeito piezoelétrico inverso.	21
Figura 6 - Representação esquemática da composição básica de um sistema de levitação acústica.	22
Figura 7 - Esquemático de formação dos nós.....	24
Figura 8 - Manipulação 3D em suspensão acústica.....	25
Figura 9 - Transdutores desconstruídos para espalhamento das ondas.	25
Figura 10 - Suvenir com levitação acústica.....	26
Figura 11 - Projeto de levitação acústica com transdutores HC-SR04.....	26
Figura 12 - Circuito do trabalho.	27
Figura 13 - Levitação acústica com defletor.	27
Figura 14 - Protótipo do artigo.	28
Figura 15 - Arduino Uno.	29
Figura 16 - Ponte H L298N.	29
Figura 17 - Transdutor 10mm.....	29
Figura 18 - Frequência de máxima pressão acústica.....	30
Figura 19 - Diretividade transdutor.	30
Figura 20 - Exemplo de protótipo.	31
Figura 21 - Exemplo de sinais oscilantes.	31
Figura 22 - Ondas oscilantes originárias do conjunto de transdutores.	32
Figura 23 - Interpolação de sinais sonoros.	32
Figura 24 - Campo acústico.....	40
Figura 25 - Esquema de ligação Transdutores.....	40
Figura 26 - Esquemático de ligação do circuito.	41
Figura 27 - Circuito final.	42
Figura 28 – Partes impressas em 3D.	44
Figura 29 - Estrutura montada.	45
Figura 30 - LCD em funcionamento.....	47
Figura 31 - Implementação física do circuito LCD.....	48

Figura 32 - Código da tela LCD.....	48
Figura 33 - Código Gerador de Frequência.....	49
Figura 34 - Objetos em Suspensão.....	51
Figura 35 - Equipamento final em funcionamento.....	52
Figura 36 - Equipamento final montado.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais e custos.....	34
------------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DC	Direct current
GND	Ground
IFSP	Instituto Federal de São Paulo
kHz	Quilohertz
LA	Levitação Acústica
MHz	Mega-hertz
MM	Milímetros
PZT	Piezoelétrico

LISTA DE SÍMBOLOS

- ϵ Permissividade dielétrica;
- λ Período completo da onda acústica.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	TEMA DO PROJETO.....	15
1.2	PROBLEMATIZAÇÃO	15
1.3	HIPÓTESES	16
1.4	OBJETIVOS.....	16
1.4.1	Objetivos Específicos	16
1.5	JUSTIFICATIVA.....	17
1.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1	PIEZELETRICIDADE.....	20
2.1.1	Efeito Piezoelétrico.....	21
2.1.2	Influência da Acústica na Manipulação de Massa.....	22
2.2	APLICAÇÃO DO EFEITO PIEZOELÉTRICO	23
2.3	PROTÓTIPOS DE LEVITAÇÃO ACÚSTICA.....	24
2.3.1	Elementos Acústicos Holográficos.....	24
2.3.2	Máquina de Levitação Ultrassônica com Arduino	25
2.3.3	Levitação Acústica por Arduino.....	26
2.3.4	Levitação Acústica com Defletor	27
2.3.5	Gotículas Suspensas com Ondas Sonoras	27
2.4	PRINCIPAIS COMPONENTES PARA LEVITAÇÃO ACÚSTICA.....	28
2.4.1	Transdutor.....	29
2.4.2	Arduino	31
2.4.3	Driver motor L298N	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1	MATERIAIS.....	33
3.2	METODOLOGIA	34
4	DESENVOLVIMENTO	36
4.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTUDO DA TEORIA	36
4.2	ANÁLISE DO PROTÓTIPO	37
4.2.1	Definições e características	38
4.3	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO INICIAL	40

4.4 IMPRESSÃO 3D DA ESTRUTURA.....	43
4.4.1 Desenho da estrutura 3d	43
4.4.2 Impressão das partes 3d.....	44
4.5 PROJETO ELETRÔNICO ADICIONAL	45
4.5.1 Alinhamento e operação	46
4.5.2 Distância entre os transdutores	46
4.5.3 Interface com o usuário por botões e tela LCD	47
4.5.4 Justificativa da interface e do modelo LCD	47
4.5.5 Controle do PWM e leitura dos botões.....	49
5 RESULTADOS.....	50
5.1 VALIDAÇÃO POR ENSAIOS	50
5.2 CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO E VALIDAÇÃO	51
5.3 DISCUSSÃO.....	53
6 CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS	56
APÊNDICE A: CÓDIGO ARDUINO	58

1 INTRODUÇÃO

Desde a descoberta do fogo, as tecnologias têm vislumbrado a humanidade com seus benefícios, e conforme evoluímos, nos tornamos dependentes da tecnologia, pois esta, faz parte da vida humana. Nunca foi tão imperativo que estudemos mais para auxiliar seu desenvolvimento, seja simplificando processos ou criando métodos de produção mais eficientes. Há também um cunho sustentável, que torna ainda mais importante estarmos em constante desenvolvimento, visto que podemos gerir melhor os recursos disponíveis presentes neste planeta.

Nesse contexto, a levitação acústica se apresenta um método que pode vir a beneficiar e auxiliar cadeias de produção na manipulação de componentes, que porventura, precisam de técnicas de manipulação estéreis, além de representar um método cirúrgico, impulsionado por fatores como segurança, por ser não invasivo e ter a vantagem de detectar fenômenos que não podem ser observados por raio-x [4]. Logo, para aprimorar o uso e a aplicação dessa tecnologia é preciso que primeiro, seus conceitos sejam compreendidos e amplamente disseminados, tornando-a popular e acessível.

Atualmente existe uma diversidade de técnicas de levitação amplamente utilizadas no mercado, como magnética, óptica e eletrostática. Cada método tem prós e contras, mas, resumidamente, é possível afirmar que a levitação magnética é uma técnica que utiliza os campos magnéticos para neutralizar os efeitos da aceleração da gravidade ou quaisquer outras forças, a levitação óptica é um método que utiliza a força transmitida por raios de luz intensos para levitar objetos mecânicos inteiros, sem o auxílio de quaisquer equipamentos magnéticos e de forças externas, enquanto que a levitação eletrostática se baseia no uso de um eletroímã para manipular materiais ferromagnéticos.

A levitação acústica não é uma descoberta recente, os primeiros documentos sugerem experimentos nos anos 30, porém ainda com diversas aplicações não exploradas [3]. Neste sentido, é preciso conhecer e desenvolver métodos para que a levitação acústica revolucione a forma como a indústria e a produção de bens de consumo é atualmente.

Na levitação acústica a energia elétrica é diretamente convertida em ondas, devido ao efeito piezoelétrico. Descoberto por Pierre e Jacques Curie em 1880, o efeito piezoelétrico consiste na variação das dimensões de certos tipos de materiais sujeitos a campos elétricos [4]. Ao se colocar materiais piezoelétricos sob o efeito de um campo magnético, as cargas da rede cristalina interagem com o material e tensões mecânicas são produzidas, o quartzo e a turmalina são exemplos desses materiais [4].

A tecnologia acústica de levitação tem inúmeras aplicações, como a produção e desenvolvimento de medicamentos, onde recentemente descobriu-se que este método pode causar a evaporação de soluções sem que elas se cristalizem ao longo do processo, o que pode torná-las mais eficazes em relação a absorção pelo corpo humano [5]. Também pode ser utilizada na fabricação de microchips, já que entre as matérias primas utilizadas existem materiais com alto nível de pureza, o que não permite que entrem em contato com quaisquer outros materiais.

1.1 TEMA DO PROJETO

O tema deste projeto é desenvolver um protótipo que auxilie na interpretação visual e técnica de funcionamento um equipamento de levitação acústica, onde espera-se que o kit sirva para demonstração do uso e manipulação das ondas ultrassônicas, permita explorar o conhecimento sobre as aplicações da LA de forma mais objetiva e que tenha características construtivas que estejam ao alcance de forma simples para uso em outros estudos.

1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

Num projeto de Levitação Acústica (LA) existem sérios conceitos envolvidos, sejam as teorias acústicas relacionadas a física, amplamente estudada no ensino superior, a eletrônica envolvida no processo de geração de ondas ultrassônicas ou os métodos de controle e ajuste fino, individual dos componentes relacionados a construção do projeto. Considerando a influência das diversas variáveis envolvidas, é um conhecimento comum entre os discentes? Como levar esse conhecimento de forma simplificada e didática a público?

As aplicações dos sistemas de LA são extremamente úteis para manipulação de materiais puros ou em quantidades tão pequenas, devido ao seu alto custo, que o contato com qualquer outro material, os tornariam inviáveis para estudo ou aplicações específicas. Para isso diversos fatores devem ser levados em consideração, supondo um bom conhecimento da estrutura dos sistemas de levitação acústica e determinados os parâmetros e a configuração de um sistema de LA, é possível prever o desempenho deste sistema?

Como supracitado, as teorias acústicas são amplamente estudadas no ensino superior, embora sejam pouco exploradas na prática, tem grande potencial no desenvolvimento de tecnologia. Em parte, uma parcela deste problema é a falta de interesse pela área e a dificuldade em compreender os conceitos. No entanto, uma forma de mitigar esse problema é a utilização

de kits didáticos demonstrativos, que ao mesmo tempo demonstrem conhecimentos teóricos vistos em sala e atraiam os estudantes para a área.

Há diversas iniciativas de construção de protótipos de levitação acústica que demonstram o efeito, mas sem relacionar aos conceitos de ondas, dado que grande parte destes materiais são não acadêmicos.

1.3 HIPÓTESES

A partir da construção de um kit de LA, é colocada a hipótese de oferecer maior possibilidade de aprendizado para os alunos em detrimento do funcionamento e protótipo do projeto

Ainda, utilizando de um método construtivista de ensino, onde os alunos são forçados a interagir com o meio em que vivem de forma prática, resolvendo problemas, levantando questões e formulando hipóteses em ambientes propícios ao desenvolvimento, o kit de baixo custo proposto no escopo deste, é viável para a realidade socioeducacional superior brasileira?

1.4 OBJETIVOS

Com o intuito de favorecer o conhecimento e a disseminação da levitação acústica, este trabalho visa desenvolver um protótipo visual, didático e dedicada para demonstrar o potencial das ondas acústicas como portadoras de matéria e facilitar o seu estudo em possíveis aplicações na indústria.

1.4.1 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, o presente trabalho também visa alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Revisar a teoria acerca da propagação de ondas sonoras e sua capacidade de carregar matéria;
- Estudar os procedimentos utilizados nos projetos de levitação acústica;
- Propor um protótipo de LA;
- Estudar recursos oferecidos pela utilização e implementação da LA.

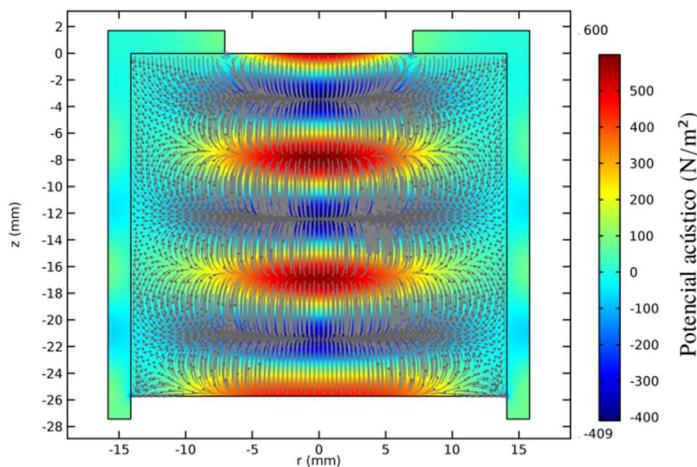
1.5 JUSTIFICATIVA

A grande importância da levitação acústica no cenário econômico mundial é observada pela demanda crescente por tecnologia que melhore os métodos e as técnicas de produção, para que a produção mundial acompanhe a demanda por produtos industrializados. Este tema deve ser abordado com propósito de desenvolver a tecnologia nacional e capacitar a mão de obra atual. Ainda, a complexidade dos projetos de levitação acústica, que envolvem questões físicas, técnicas e econômicas, mostra a necessidade e relevância de popularizar este conhecimento.

Diversos trabalhos foram desenvolvidos em universidades brasileiras, com o propósito de explorar e compreender melhor esta tecnologia, como o da Universidade Federal de Alfenas (UFAL), que aborda os princípios físicos, por meio do software COMSOL Multi-physics, onde projetam um transdutor do tipo langevin de face plana e operam a aproximadamente 20kHz para estudar a força de radiação acústica [7].

O trabalho teve como objetivo principal, o estudo dos fenômenos de força de radiação acústica aplicada a levitação de partículas, obtendo resultados das simulações do transdutor projetado, e modelando um sistema de levitação acústica, utilizando o mesmo software (COMSOL). Através das simulações, pode-se estudar a força de radiação acústica que seria gerada através das ondas produzidas no transdutor projetado ao colidir em partículas em um sistema de levitação acústica, Figura 1, usando de base o método de Gor'Kov, que abrange partículas de raios muito menores que o comprimento das ondas.

Figura 1 - Rastreamento de partículas, com Background de potencial acústico normalizado.



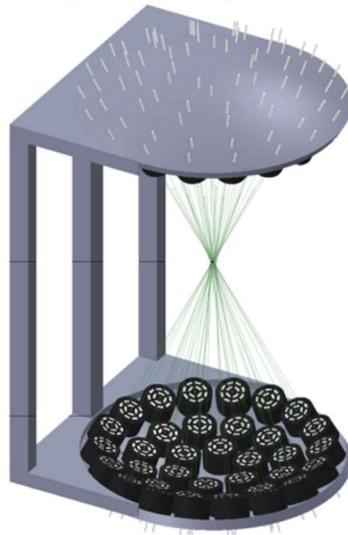
Fonte: [7].

Ainda, podemos citar a Universidade Federal de Uberlândia (UFU), e o trabalho da doutoranda da Faculdade de Engenharia Mecânica (Femec), Geisa Zuffi, que baseia-se em

trabalhos do professor Izhak Bucher, do instituto Technion, em Israel, métodos de uso da LA no processo de fabricação industrial [13].

O trabalho dos alunos do Instituto Federal de São Paulo (IFSP), Gabriel Xavier Luz e Alex Lino [14], exploram o uso da levitação acústica aplicado ao ensino de ondulatória, relacionando-a ao mundo vivenciado pelos estudantes, mais significativo e questionador, avaliando uma metodologia de ensino baseada em uma atividade experimental e tendo como subsídio a teoria da aprendizagem significativa e a intenção de verificar se a levitação acústica é uma atividade com potencial de auxiliar estudantes de graduação e ensino básico a aprender conceitos importantes de física, propondo, inclusive a construção de um protótipo, Figura 2, que forneça a prática na qual se aplicariam as teorias estudadas em ambiente acadêmico.

Figura 2 - Protótipo de LA.



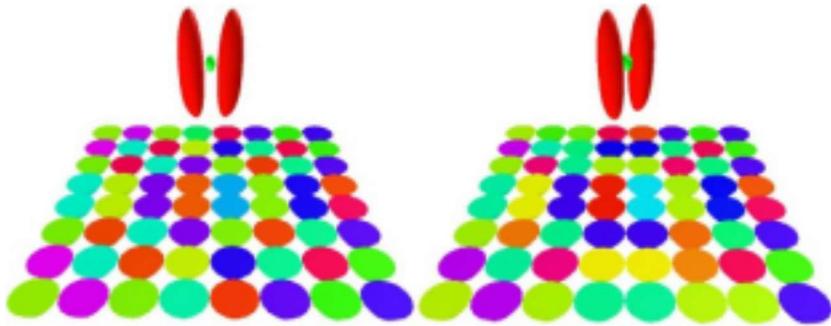
Fonte: [20].

Há também trabalhos avançados na área, utilizando dos mesmos conceitos, mas com controle fino e individual dos componentes, como o publicado na revista Nature Communications por Asier et al. [12]. O trabalho em questão inclui, técnicas e métodos que permite que os objetos possam ser levitados e manipulados em um espectro tridimensional, introduzindo uma matriz de elementos holográficos, baseados no jogo Twister, que permite a criação de armadilhas moldáveis, como pinças ou garras [12], Figura 3.

Enquanto que no escopo desta busca-se compreender melhor esta tecnologia, sua aplicabilidade e o desenvolvimento de uma forma de exemplificar, didaticamente, toda a ciência envolvida para o meio acadêmico, para isto será utilizado no projeto, transdutores comerciais, uma quantidade significativa de componentes, com aproximadamente 10mm, que operam na faixa de 40Khz. Se aliarmos os componentes com um controle eletrônico, dado por um módulo

L298N, poderemos modular campos planares de ondas, que capturam e mantém, objetos em equilíbrio.

Figura 3 - armadilhas em diferentes posições combinando uma assinatura holográfica.



Fonte: [12].

1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visto a importância da levitação acústica no cenário econômico atual e a complexidade do projeto, esta tecnologia pode sanar uma demanda real, e desempenhar um papel importante economicamente.

Durante o desenvolvimento do trabalho, serão consultadas referências relacionadas à levitação acústica, aspectos técnicos, efeitos mecânicos e químicos que a tornam possível e aplicações. As informações oriundas da LA serão tratadas de forma fragmentada, tendo seções específicas para introdução (seção 1), efeito piezoelétrico, manipulação de massa e espelhamento, aplicação do efeito piezoelétrico em LA, protótipos de levitação acústica, referencial teórico (seção 2), materiais e métodos (seção 3), desenvolvimento (seção 4), resultados (seção 5) e conclusão (seção 6). Espera-se desse modo, alcançar os diversos objetivos do trabalho, desenvolvendo uma ferramenta que auxilie no entendimento do projeto de LA e permita a viabilidade destes sistemas.

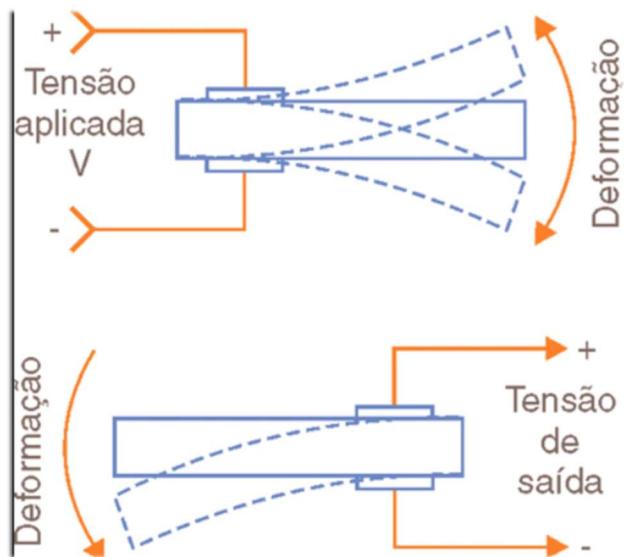
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são abordados importantes tópicos sobre a levitação acústica, de modo a ilustrar o atual estágio de desenvolvimento desses sistemas. Além disso, variáveis e componentes da LA são abordados visando-se contemplar os tópicos essenciais para o conhecimento do funcionamento destes sistemas e posterior desenvolvimento do protótipo e alcance dos demais objetivos propostos.

2.1 PIEZELETRICIDADE

O efeito piezoelétrico é o fenômeno de alguns cristais, como quartzo, onde tensões mecânicas conseguem produzir correntes elétricas, e vice-versa. Embora pareça simples, não é qualquer cristal, que dispõe das características essenciais para ser induzido por tal fenômeno, primeiramente deve-se atentar ao corte, devendo ser cortado de forma que um campo elétrico alternado, possa interferir em sua espessura tornando-a variável. Conclui-se, então, que as faces do cristal devem estar sujeitas a uma espécie de ressonância natural, que por sua vez origina ondas sonoras. Todo transdutor possui uma frequência de ressonância natural, e quanto menor a espessura do cristal, maior será a sua frequência de vibração, Figura 4.

Figura 4 - Demonstração do efeito piezoelétrico.



Fonte: [9].

Podemos explicar o efeito através assimetria de polarização dos materiais, porém alguns materiais como titanato zirconato de chumbo (ou PZT, por exemplo, podem apresentar a piezoelectricidade mensurável, chegando a converter até 80%, da energia mecânica em elétrica,

quando houver uma deformação em sua estrutura estática em cerca de 0.1% da configuração inicial, podendo apresentar o efeito reverso caso um campo elétrico externo seja aplicado ao material [6]($PbZrO_3$).

Pode-se representar o efeito piezoelétrico, baseado na simetria dos materiais através das seguintes formulas:

- Efeito piezoelétrico direto:

$$D = dT + \epsilon E \quad (1)$$

- Efeito piezoelétrico reverso:

$$S = sT + dE \quad (2)$$

Em que:

D-é o vetor de deslocamento elétrico;

d-é o coeficiente piezoelétrico;

T-é a tensão mecânica;

ϵ -é a permissividade dielétrica;

E-é o campo elétrico;

S-é a deformação;

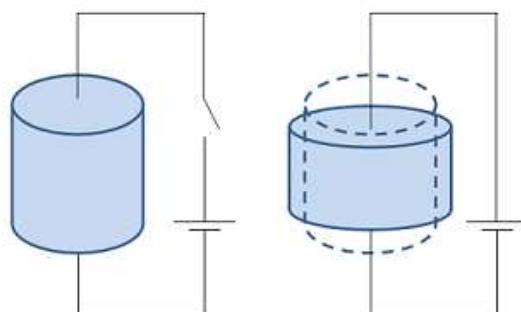
s-é o coeficiente elástico.

2.1.1 Efeito Piezoelétrico

Com isso, pode-se definir o efeito piezoelétrico como sendo uma relação eletromecânica linear entre as forças mecânicas e internas do material piezoelétrico.

O processo piezoelétrico é um processo completamente reversível, os materiais dispõem de um efeito direto, onde há geração interna de carga elétrica como resultado da força mecânica aplicada, e um efeito inverso, no qual ocorre geração interna de tensão mecânica devido à aplicação de um campo elétrico [7], Figura 5, sendo considerado fundamental na geração de ondas ultrassônicas.

Figura 5 - Efeito piezoelétrico inverso.



Fonte: [19].

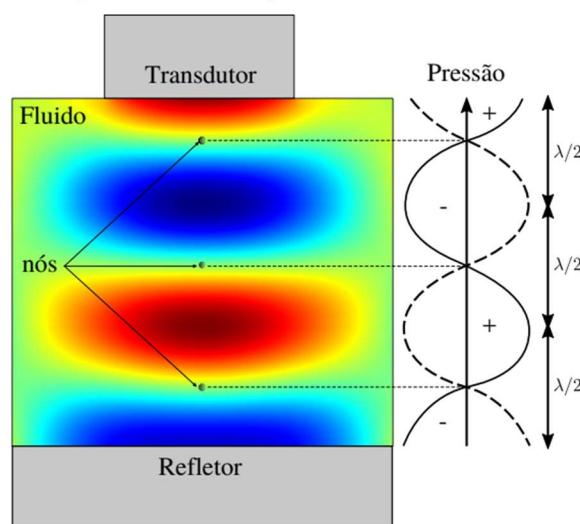
2.1.2 Influência da Acústica na Manipulação de Massa.

As ondas acústicas ao se propagarem perturbam o meio em que se encontram, além de transportarem energia a manipulação que exercem durante sua propagação cria zonas de baixa pressão, e ambientes de micro gravidade, ou seja, equilibra a influência da gravidade sobre um corpo específico quando aplicado ao fenômeno, isso é denominado radiação acústica [7].

A levitação acústica tem grande aplicabilidade na química analítica e na química bioanalítica, pois muitas substâncias ao serem analisadas quimicamente detêm custos elevados, e por isso necessitam que sejam analisadas em pequenas quantidades, com muito cuidado já que, devido a pequena quantidade, estão sujeitas a contaminação com as paredes do recipiente [7], devido à natureza do método de manipulação, sem contado, sana esse problema de contaminação, dentre inúmeras aplicações.

Um sistema de levitação acústica é composto por um transdutor acústico, que gera a onda acústica, e por um refletor, que viabiliza a sobreposição das ondas acústicas ao serem refletidas. Esse sistema pode ser visualizado na Figura 6, note que quando o refletor e o transdutor são separados por uma distância que é igual a um múltiplo inteiro de meio comprimento de onda (no caso da Figura 6 $\cdot \lambda/2$), os pontos de máximas e mínimas amplitudes da onda incidente e refletida se sobrepõem, gerando pontos de máxima e mínima pressão bem nítidos, o que proporciona o aprisionamento das partículas nos nós de pressão [7], ou nas zonas de microgravidade. No caso da Figura 6, temos 3 nós, ou seja, 3 regiões de microgravidade, sendo que se uma partícula for colocada em outra posição do levitador, ela tenderá a se acomodar em uma das regiões.

Figura 6 - Representação esquemática da composição básica de um sistema de levitação acústica.



Fonte: [7].

2.2 APLICAÇÃO DO EFEITO PIEZOELÉTRICO

Como descrito, o efeito piezoelétrico advém do fenômeno vibratório, onde correntes elétricas produzem tensões mecânicas em uma classe específica de cristais, gerando ondas sonoras controláveis. Mas, para compreender o funcionamento da LA é necessário entender conceitos relacionados a gravidade, o ar e o som.

1. Primeiro, a gravidade é uma força que faz com que objetos se atraiam uns aos outros. Um objeto enorme, como a Terra, atrai facilmente objetos que estão perto dele, como maçãs penduradas em árvores. Os cientistas ainda não decidiram exatamente o que causa essa atração, mas acreditam que ela existe em todo o universo [9].
2. Segundo, o ar é um fluido que se comporta essencialmente da mesma maneira que os líquidos. Como líquidos, o ar é feito de partículas microscópicas que se movem em relação umas às outras e também se move como a água faz, na verdade, alguns testes aerodinâmicos ocorrem debaixo d'água em vez de no ar. As partículas em gases, como as que compõem o ar, são simplesmente mais distantes e se movem mais rápido do que as partículas em líquidos [9].
3. Em terceiro lugar, o som é uma vibração que viaja através de um meio, como um gás, um líquido ou um objeto sólido. Se você tocar um sino, o sino vibra no ar. À medida que um lado do sino se move para fora, ele empurra as moléculas de ar ao lado dele, aumentando a pressão naquela região do ar. Esta área de maior pressão é uma compressão. À medida que o lado do sino se move para trás, ele puxa as moléculas separadas, criando uma região de baixa pressão chamada de rarefação. Sem esse movimento de moléculas, o som não poderia viajar, e é por isso que não há som no vácuo.

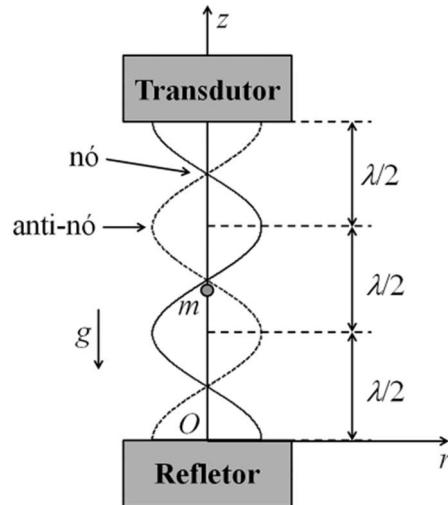
Dito isso, um protótipo de levitação acústica básico tem duas partes principais: um transdutor, que é uma superfície vibrante que faz o som, e um refletor. Muitas vezes, o transdutor e o refletor têm superfícies côncavas para ajudar a concentrar o som. Uma onda sonora viaja para longe do transdutor e salta do refletor [9]. Três propriedades básicas desta viagem, refletindo onda ajudam a suspender objetos no ar:

- Reflexão da onda sonora fora de uma superfície;
- interação entre suas compressões;
- rarefação causa-interferência.

Compressões que atendem outras compressões amplificam umas às outras, e compressões que atendem a rarefações equilibram umas às outras. Às vezes, reflexão e interferência podem se combinar para criar uma onda de pé, que parecem mudar para frente e para trás ou vibrar em segmentos em vez de viajar de um lugar para outro. Essa ilusão de quietude é o que dá nome às ondas de pé [9].

Ondas sonoras em pé têm nós definidos, ou áreas de pressão mínima, e anti-nós, ou áreas de pressão máxima, Figura 7. Os nós de uma onda de pé estão na razão da levitação acústica, ao colocar um refletor a distância certa de um transdutor, o levitador acústico cria uma onda de pé. Quando a orientação da onda é paralela à atração da gravidade, partes da onda em pé têm uma pressão constante para baixo e outras têm pressão ascendente constante. Os nódulos têm pouca pressão, e lá devemos posicionar os objetos para que possam sofrer influência da irradiação acústica e levitar.

Figura 7 - Esquemático de formação dos nós.



Fonte: [17].

2.3 PROTÓTIPOS DE LEVITAÇÃO ACÚSTICA

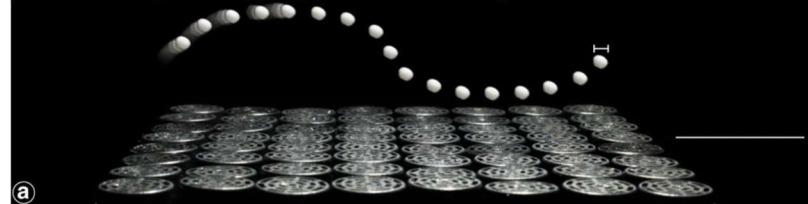
É válido destacar alguns trabalhos que serviram de alicerce para a redação deste, e da teoria que envolve a construção do kit didático de fácil confecção.

2.3.1 Elementos Acústicos Holográficos

No trabalho [12], foi otimizado as fases usadas para conduzir uma matriz em fases ultrassônicas e foi mostrado que a levitação acústica pode ser empregada para traduzir, girar e manipular partículas usando até mesmo um emissor unilateral [12]. Além disso, foi introduzido

a estrutura de elementos acústicos holográficos que permitem a rápida geração de armadilhas e fornecem uma ponte entre armadilhas ópticas e acústicas. Estruturas acústicas em forma de pinças, Twister ou garrafas emergem como os mecanismos ideais para raios tratores ou transporte sem contêineres [12], Figura 8.

Figura 8 - Manipulação 3D em suspensão acústica.



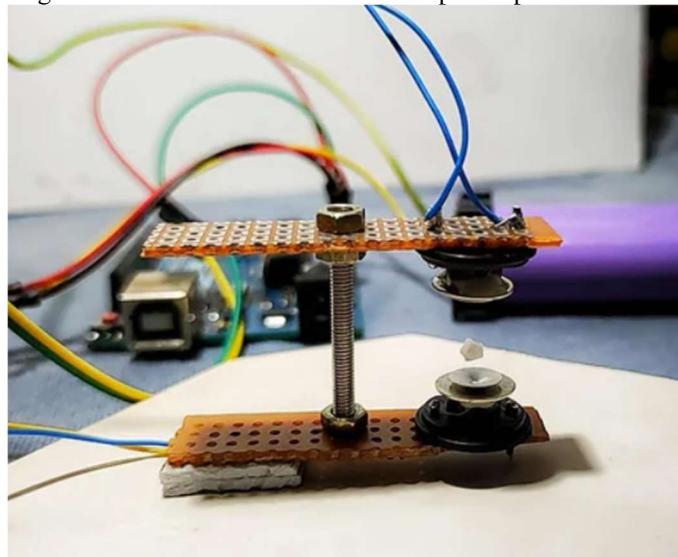
Fonte: [12].

2.3.2 Máquina de Levitação Ultrassônica com Arduino

Em [11], é feito um sistema muito similar ao apresentado no escopo deste, em escala menor, neste caso, usando um par de transdutores, com intuito de demonstrar conceitos de levitação acústica de forma mais simples, Figura 9. Embora existam divergências, como a desconstrução dos transdutores para que haja um espalhamento melhor das ondas, também, as ligações do circuito que são mais simples, devido a quantidade de transdutores a serem controlados e a própria estrutura, que embora simples, bastante prática para os objetivos pleiteados.

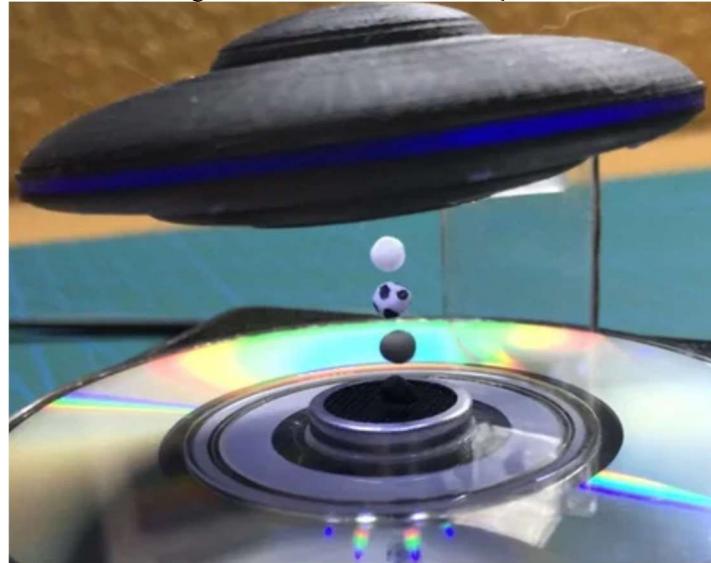
Existem muitas variações dos projetos de levitação acústica, e até formas de inovar utilizando este sistema e seu princípio curioso para diversão, como visto na Figura 10 [8].

Figura 9 - Transdutores desconstruídos para espalhamento das ondas.



Fonte: [11].

Figura 10 - Suvenir com levitação acústica.

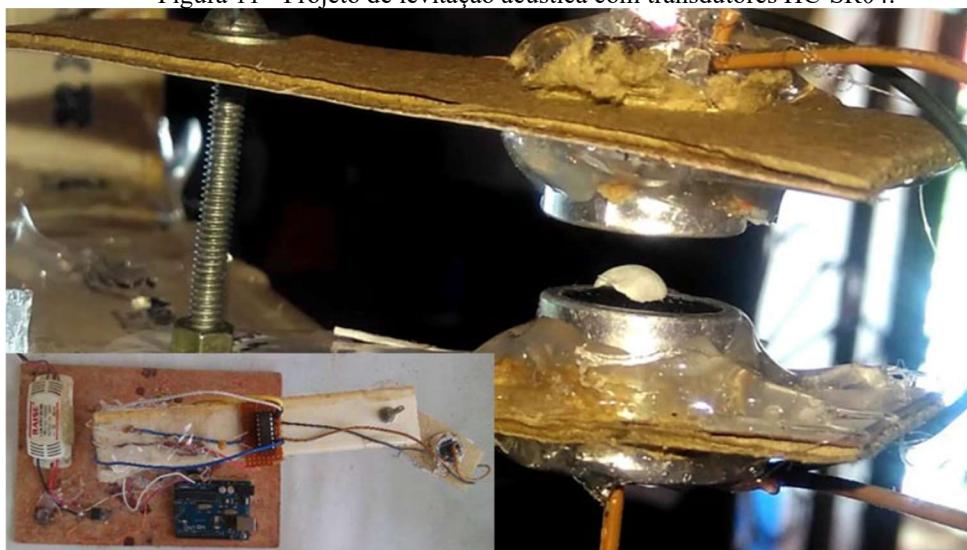


Fonte: [15].

2.3.3 Levitação Acústica por Arduino

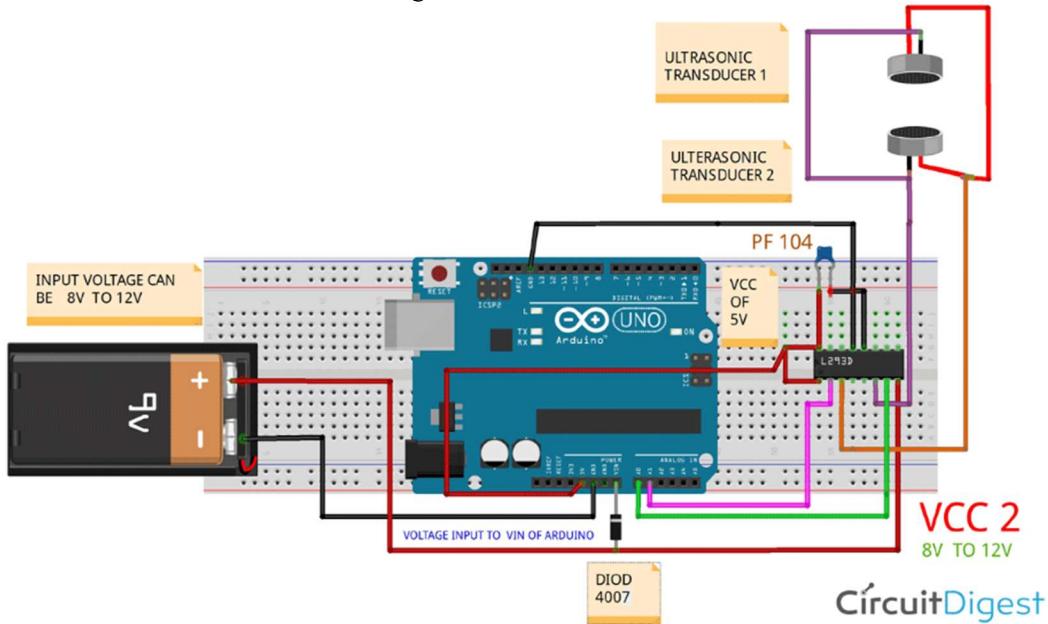
Outro trabalho que utiliza Arduino é apresentado em [18]. Embora simples, o projeto demonstra com êxito a técnica de levitação acústica (LA), apresentando algumas diferenças sutis em relação à maioria dos kits atualmente disponíveis. Ao contrário da maioria dos projetos, são utilizados o Arduino ATMEGA 328P, o diodo 4007, o capacitor PF 104 e um regulador de tensão LM 7809. Esses componentes permitem gerar e alimentar os sinais necessários para a levitação, embora não ofereçam todos os recursos de controle e proteção presentes no módulo L298N, como a capacidade de atuar como ponte H completa e fornecer maior corrente, Figura 11 e Figura 12.

Figura 11 - Projeto de levitação acústica com transdutores HC-SR04.



Fonte: [18].

Figura 12 - Circuito do trabalho.

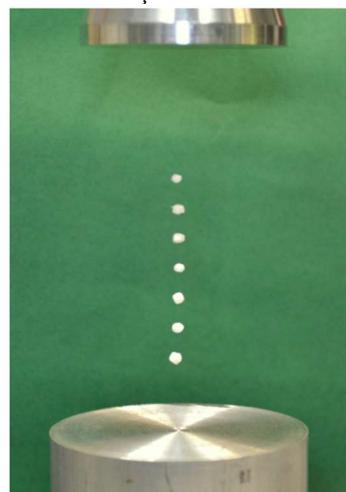


Fonte: [18].

2.3.4 Levitação Acústica com Defletor

Já o trabalho de [17], como indicado na Figura 13, temos um sistema diferente, em que ao invés de se usar um par de transdutores, usa-se apenas 1, de modelo industrial, pareado a um defletor que tem como função refletir a onda emitida, similar ao apresentado na Figura 7. Este sistema também funciona com frequências mais baixas, próximas dos 24,3kHz, o que permite que a levitação de partículas maiores seja possível.

Figura 13 - Levitação acústica com defletor.

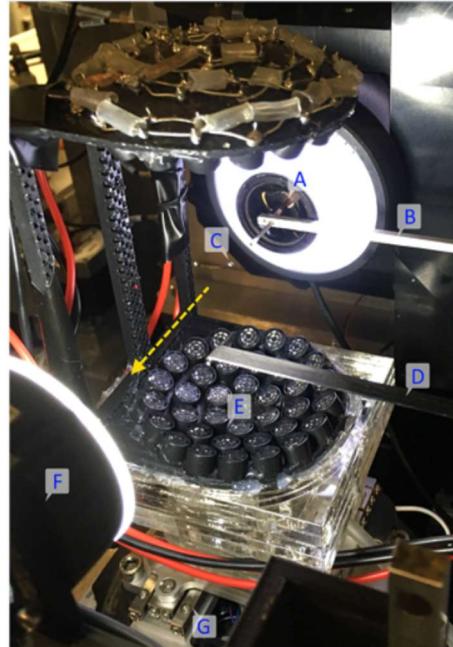


Fonte: [17].

2.3.5 Gotículas Suspensas com Ondas Sonoras

Inicialmente desenvolvido por pesquisadores da Universidade de Bristol, o protótipo realizado em [20], é um pequeno levitador acústico não ressonante de um eixo único construído a partir de componentes fora da prateleira [20]. Em trabalho recentemente publicado na Scientific Reports, engenheiros da Diamond liderados pelo Dr. Pete Docker usaram o sistema TinyLev para dispensar e conter gotículas de amostras em experimentos de cristalografia de proteínas [20]. Este método facilita a aquisição eficiente de dados de raios-X em estudos dinâmicos à temperatura ambiente, Figura 14.

Figura 14 - Protótipo do artigo.



Fonte: [20].

2.4 PRINCIPAIS COMPONENTES PARA LEVITAÇÃO ACÚSTICA

Diversos componentes estão relacionados a geração e sustentação de uma levitação acústica estável. O princípio de trabalho do circuito é muito simples e seu principal componente é um Arduino, Figura 15, responsável por rodar a lógica que comandará os demais componentes, estabelecendo os parâmetros ideais para a LA.

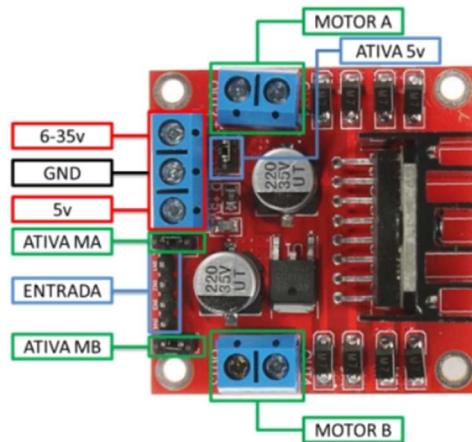
Figura 15 - Arduino Uno.



Fonte: [22].

Ainda, será preciso utilizar um driver motor ponte H L298N, Figura 16, construído para controlar cargas indutivas como relés, solenoides, motores DC e motores de passo. Com este componente será possível controlar independentemente a frequência aplicada a cada transdutor, de acordo com o especificado no Arduino.

Figura 16 - Ponte H L298N.



Fonte: [23].

Por fim, o transdutor ultrassônico, similar ao presente nos módulos HCSR04, Figura 17, geralmente, este módulo ultrassônico transmite uma onda acústica de um sinal de frequência entre 25khz e 50 kHz, e neste projeto, dependeremos da capacidade de alcançar estas frequências para podermos gerar uma LA estável.

Figura 17 - Transdutor 10mm.

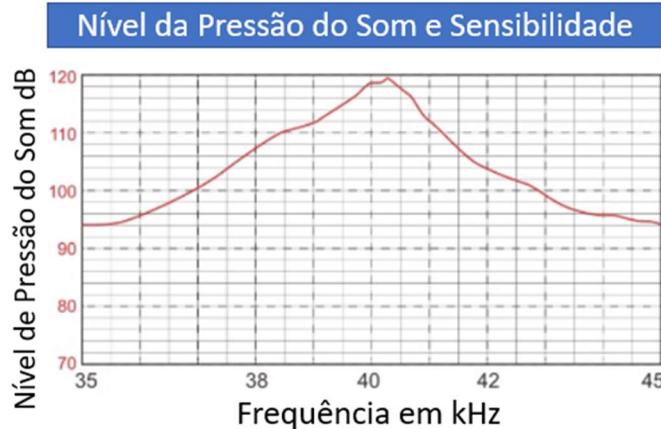


Fonte: [21]. <https://pt.aliexpress.com/store/911783783>

2.4.1 Transdutor

Segundo dados obtidos através do fabricante dos transdutores, a zona de maior pressão acústica ou densidade acústica, está em torno dos 40Khz. Ou seja, o ponto de maior irradiação acústica do componente, indicado na Figura 18, será onde haverá maior energia mecânica disponível, como indicado na Figura 19, e que possibilitará uma levitação estável de objetos com pequena massa.

Figura 18 - Frequência de máxima pressão acústica.



Fonte: [21].

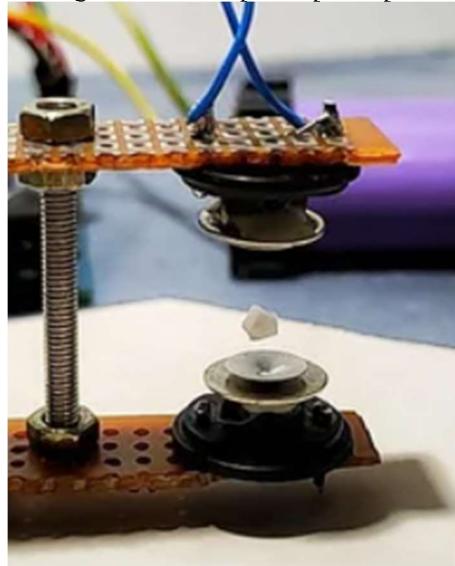
Figura 19 - Diretividade transdutor.



Fonte: [21]. <https://pt.aliexpress.com/store/911783783>

Embora, em alguns casos, como realizado pelo entusiasta Edison Corner [11], indicado na Figura 20, primeiro deve-se desmantelar o transmissor e o receptor do módulo ultrassônico, removendo inclusive a tampa protetora e conectando fios longos a ela.

Figura 20 - Exemplo de protótipo.



Fonte: [11].

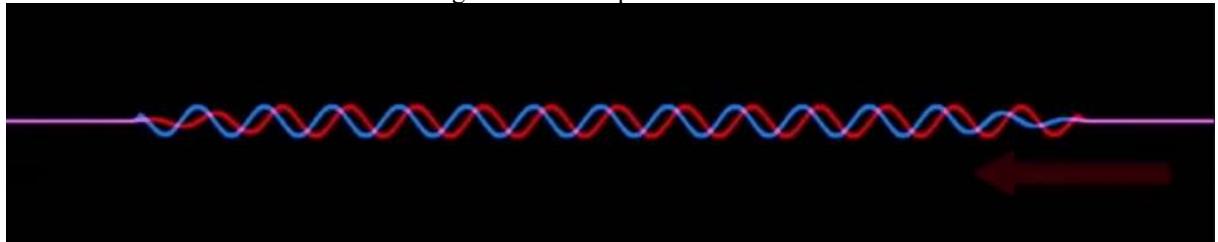
Em seguida, é preciso colocar o transmissor e receptor um sobre o outro tendo em mente que a posição dos transdutores ultrassônicos é muito importante. Eles devem se enfrentar na direção oposta, para que no alinhamento as ondas sonoras ultrassônicas possam viajar e se cruzar em direções opostas.

2.4.2 Arduino

O objetivo do uso do Arduino é gerar um sinal de oscilação de alta frequência, entorno de 40KHz, e este pulso é aplicado à entrada do driver motor ponte H L298N (IN1, IN2, IN3 e IN4) para conduzir o transdutor ultrassônico. E para isso, é preciso implementar uma lógica que oriente o sistema a agir da forma que precisamos, lógica essa, será apresentada na continuidade deste trabalho (TCC 2).

A codificação permite que um temporizador e interrupções desativadas, fazendo pinos de saída altos ou baixos (0/1) e gerando um sinal oscilante, Figura 21, de 40Khz para pinos de saída Arduino A0, A1, A2 e A3.

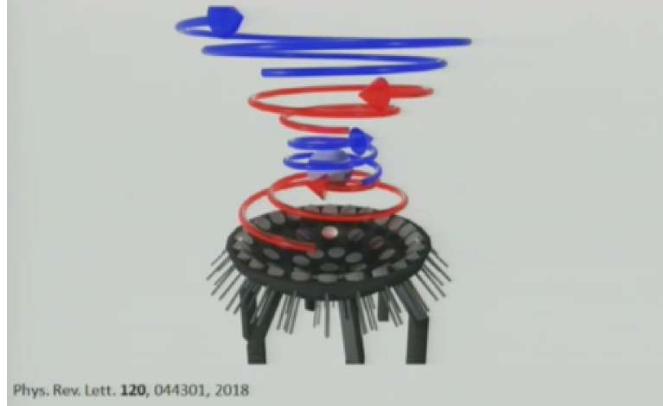
Figura 21 - Exemplo de sinais oscilantes.



Fonte: O autor.

Finalmente, este sinal de oscilação de alta frequência de 40KHz juntamente com a tensão de condução através da condução (tipicamente 7,4v) no transdutor ultrassônico, produz ondas sonoras acústicas, Figura 22.

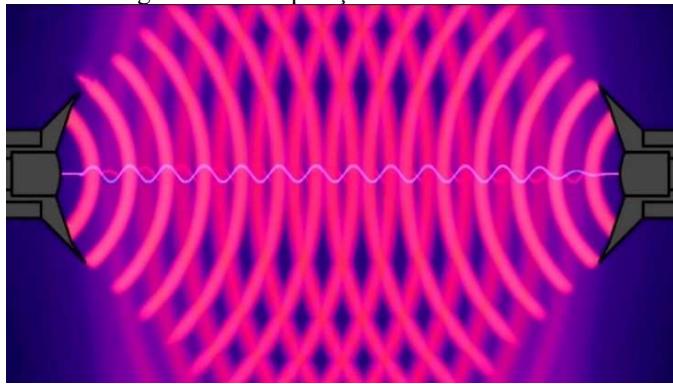
Figura 22 - Ondas oscilantes originárias do conjunto de transdutores.



Fonte: [18].

Ao colocamos dois conjuntos de transdutores cara a cara na direção oposta de tal forma que algum espaço é deixado entre eles, as ondas sonoras acústicas viajam entre dois transdutores e permitem que o objeto flutue graças a interpolação das ondas, criando, nós e anti-nós simultâneos, Figura 23.

Figura 23 - Interpolação de sinais sonoros.



Fonte: O autor.

2.4.3 Driver motor L298N

O driver motor L298N é muito utilizado para o propósito de controle de motores, ele nada mais é que uma ponte H em um componente integrado. Uma das vantagens do uso desse CI é o menor espaço ocupado, a baixa complexidade do circuito e o fato de ele já possuir dois circuitos H, podendo assim, controlar dois motores, como indicado anteriormente na Figura 16.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Diversos métodos e estudos estavam disponíveis acerca da levitação acústica, desde experimentos com tipos alternativos de transdutores até a variação das frequências para obter melhor irradiação ou densidade acústica. Foram adquiridos os componentes necessários para a montagem do protótipo do projeto, salientando-se a necessidade de recursos de laboratório para confecção e montagem. Os objetos incluíam a estrutura para fixação do levitador acústico, bem como os componentes eletrônicos, a MCU, a ponte H, a fiação, o display e demais periféricos de montagem necessários.

Utilizando os referenciais teóricos, a montagem consistiu na construção do protótipo em hardware, configurando e ajustando os valores de frequência e tensão para encontrar os pontos de ressonância, ou seja, localizando os pontos de alta e baixa pressão. Os fenômenos físicos envolvidos nessa tecnologia permitiram fazer com que o objeto inserido pudesse levitar, fosse por concatenação de ondas acústicas ou pela reflexão das mesmas em uma superfície deflectora. A dificuldade esteve em localizar os pontos concatenados das ondas acústicas, ressaltando-se que a verificação do funcionamento ocorreu com base na utilização de um osciloscópio de bancada, medindo diretamente a frequência e a amplitude do sinal de saída da ponte H.

Após os testes com o osciloscópio, foi necessário ajustar a altura do objeto a ser levitado. O objeto, quando inserido no levitador, apresentou pequenos movimentos, indicando a presença das regiões de alta e baixa pressão. Com as tentativas de soltar o objeto, caso estivesse na localização dos pontos concatenados das ondas acústicas, este permanecia em suspensão, conforme o esperado.

3.1 MATERIAIS

Inicialmente, além dos componentes principais, isto é, aqueles que são indispensáveis para o projeto, o Arduino, o driver de motor L298N e o transdutor, descritos no capítulo anterior, usaremos também alguns materiais auxiliares, como estanho, baterias, adaptadores, jumpers e filamento para impressas em 3D.

Pensando na praticidade e facilidade didática do kit, usaremos um transdutor facilmente encontrado no mercado, e de uso comum em experimentos de levitação acústica, o transdutor de 10 mm, com maior densidade de radiação acústica na zona de 40Khz o que vai possibilitar levitar objetos pequenos, porém significativos para demonstração do conceito. O resumo dos materiais é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Materiais e custos.

Unidade	Item	Valor
1x	Arduino Uno	R\$ 68,00
1x	Adaptador conector P4	R\$ 04,00
1x	Bateria 09v 1 A	R\$ 24,67
1x	Estanho 1.0mm 63x67 HS-63 22G	R\$ 18,90
1x	Filamento para impressão 3D 1,75mm 1kg	R\$ 78,90
1x	Fonte de alimentação 12v 5 A	R\$ 55,25
1x	Interruptor de ligação	R\$ 01,60
1x	Kit jumpers	R\$ 12,64
1x	Módulo L298N	R\$ 10,15
76x	Transdutores	R\$ 231,85
	Total	R\$ 595,06

3.2 METODOLOGIA

Para realizar o trabalho, foram seguidas as seguintes etapas de desenvolvimento, conforme indicado abaixo:

1. Análise Teórica da Levitação Acústica: Foi realizada uma abordagem conceitual sobre os fundamentos que nortearam a ciência das ondas sonoras e acústicas, destacando os princípios físicos envolvidos na propagação e interação das ondas. Enfatizou-se a teoria das ondas estacionárias e o fenômeno da ressonância, que constituíram a base para a ocorrência da levitação acústica, conforme discutido no Capítulo 1 deste trabalho.
2. Levantamento de Recursos e Materiais Necessários: Nesta etapa, foram especificados os itens de hardware e os componentes indispensáveis para a montagem do protótipo, bem como a necessidade de infraestrutura laboratorial, incluindo a bancada eletrônica e os instrumentos de medição.
3. Construção do Protótipo: A partir da definição dos materiais, foi realizada a montagem do sistema, considerando as conexões do microcontrolador (MCU) com os demais periféricos de hardware, conforme apresentado na Tabela 1.
4. Modelagem e Impressão 3D da Estrutura: A estrutura física do protótipo, destinada a comportar os transdutores e os demais componentes, foi confeccionada por meio de impressão 3D. Essa escolha justificou-se pela ausência de uma placa de circuito impresso (PCB) específica para este projeto, sendo empregados módulos e componentes discretos.

5. Integração de Componentes Adicionais: Foram realizados ajustes técnicos na disposição dos módulos e periféricos, adequando a organização dos pinos do MCU, a alimentação elétrica (12 V) e o cabeamento (jumpers), de forma a otimizar a montagem e garantir a estabilidade do sistema.
6. Avaliação e Testes do Protótipo: A última etapa consistiu na validação prática do projeto, com a realização de testes elétricos e funcionais. Foram verificadas as tensões em pontos estratégicos do circuito e a frequência de operação nos transdutores, assegurando o correto funcionamento do MCU e a efetividade do processo de levitação acústica.

4 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento deste trabalho foi organizado em etapas sequenciais, assegurando coerência entre a fundamentação teórica, a seleção dos recursos e a construção prática do protótipo de levitação acústica.

Primeiramente, realizou-se a análise teórica da levitação acústica, abordando os conceitos de propagação de ondas sonoras, formação de ondas estacionárias e efeitos de ressonância, que serviram de base para o projeto. Em seguida, definiu-se o levantamento dos recursos e materiais necessários, incluindo o microcontrolador, os transdutores, os módulos auxiliares e a infraestrutura laboratorial composta por bancada eletrônica, fonte de alimentação e instrumentos de medição.

Com os recursos estabelecidos, passou-se à montagem do protótipo, integrando o microcontrolador (MCU) aos demais periféricos e desenvolvendo a estrutura física por meio de impressão 3D. Essa alternativa foi escolhida devido à ausência de uma placa de circuito impresso (PCB) exclusiva para o projeto, possibilitando a utilização de módulos e componentes discretos.

Por fim, realizaram-se ajustes técnicos envolvendo a disposição dos pinos do microcontrolador, a alimentação elétrica e a organização do cabeamento, garantindo a estabilidade elétrica e mecânica do sistema.

Cada uma dessas etapas será detalhada nas próximas subseções, apresentando o desenvolvimento completo do protótipo.

4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTUDO DA TEORIA

O levantamento bibliográfico foi conduzido por meio da consulta a artigos científicos, teses, dissertações e materiais técnicos disponíveis em bases de dados acadêmicas, livros de física aplicada e publicações especializadas em acústica. Também foram analisados projetos experimentais já desenvolvidos em laboratórios e kits didáticos disponíveis comercialmente, com o objetivo de identificar diferentes abordagens para a obtenção da levitação acústica. Esse processo permitiu mapear as técnicas mais utilizadas, avaliar suas vantagens e limitações e selecionar aquelas que melhor atendiam ao propósito deste trabalho: a construção de um protótipo acessível, prático e com caráter didático.

Para que chegássemos a um projeto de construção prática e barata, foi preciso aplicar um filtro, baseado em requisitos de construção e parâmetros de conhecimento do público no qual

este trabalho está interessado (Alunos do ensino médio e graduação). Isso possibilitou fragmentar as teorias encontradas, reunindo as melhores técnicas para criar um protótipo acessível, didático e de baixo custo.

Para compreender a levitação acústica, é necessário entender a gravidade, o ar e o som. A gravidade é uma força que atrai objetos uns aos outros; a Terra, por exemplo, atrai facilmente objetos próximos, como maçãs em árvores.

4.2 ANÁLISE DO PROTÓTIPO

O levitador acústicos opera a partir da interação entre ondas sonoras emitidas e refletidas, formando uma onda estacionária. Essa onda apresenta pontos de mínima e máxima pressão, chamados, respectivamente, de nós e antinodos. Quando a distância entre o emissor e o refletor é ajustada corretamente, cria-se uma zona estável nos nós, capaz de sustentar pequenos objetos, resultando na levitação acústica.

O processo de preparação do sensor ultrassônico inicia-se com a dessoldagem do transmissor e do receptor do módulo, que devem ser cuidadosamente removidos da placa de circuito impresso. Após a retirada da capa protetora, realizam-se as soldagens de fios mais longos nos terminais dos transdutores, de modo a facilitar seu posicionamento e os ajustes necessários nas etapas seguintes.

Na etapa de montagem, os transdutores são alinhados um de frente para o outro, porém em sentidos opostos, garantindo que as ondas ultrassônicas sejam emitidas e recebidas de forma direta e precisa. Para manter essa configuração estável e bem definida, recomenda-se a utilização de espuma, porcas e parafusos, assegurando o correto alinhamento e a eficiência do sistema.

Por fim, a programação do Arduino emprega *timers* e rotinas de interrupção para gerar um sinal oscilante de 40 kHz nos pinos A0 e A1. Esse sinal alterna entre os estados lógicos alto (1) e baixo (0), controlando a emissão e a recepção dos pulsos ultrassônicos necessários para a formação da onda estacionária.

Na definição do protótipo, buscou-se conciliar praticidade de construção e fidelidade na demonstração do fenômeno. Para tanto, foram considerados fatores como a disponibilidade dos transdutores, a frequência de operação compatível com os efeitos esperados e a facilidade de integração com o microcontrolador (MCU), assegurando que o sistema fosse capaz de reproduzir, de maneira visível e estável, o comportamento previsto no estudo inicial.

Outro fator importante foi a necessidade de que o protótipo fosse compacto e de baixo custo, sem abrir mão da facilidade de montagem didática. A estrutura deveria comportar todos os módulos discretos de maneira organizada, garantindo a correta disposição dos transdutores e a estabilidade mecânica necessária para a formação dos pontos de levitação. Essa escolha atendeu ao objetivo central de tornar o experimento acessível para ambientes educacionais.

Por fim, considerou-se também a simplicidade na montagem e replicação. O uso de kits modulares e componentes facilmente encontrados no mercado nacional foi decisivo para que o protótipo pudesse ser reproduzido com bases nos fenômenos esperados. Dessa forma, a construção resultou em um dispositivo funcional, didático e acessível, alinhado com os parâmetros definidos a partir da revisão inicial.

Acerca do protótipo, o mesmo consiste em um circuito simples que utiliza um Arduino, um circuito integrado (CI) de acionamento de motor L298D e um transdutor ultrassônico HCSR04. O HCSR04, normalmente operando entre 25kHz e 50kHz, é configurado neste projeto para trabalhar a 40kHz. O Arduino gera um sinal de oscilação de 40kHz que é aplicado à entrada do driver de motor duplo L298D (através dos pinos A0 e A1 do Arduino). Esse sinal, juntamente com a tensão de acionamento (geralmente 7,4V), é fornecido ao transdutor ultrassônico.

Como resultado, o transdutor emite ondas sonoras acústicas. Os packs de transdutores são posicionados face a face, em direções opostas, com um espaço entre eles. Essas ondas sonoras viajam entre os packs de transdutores, criando ondas estacionárias com nós e antinodos, e permitem que um objeto flutue entre eles.

4.2.1 Definições e características

O kit selecionado para este trabalho apresenta como principal característica a utilização de um conjunto de transdutores piezoelétricos operando em frequência ultrassônica, organizados em pares que permitem a formação de ondas estacionárias. Essa configuração garante a criação de pontos nodais, fundamentais para a sustentação de pequenas partículas em suspensão. O funcionamento é controlado por um microcontrolador, que gera o sinal elétrico necessário para a excitação dos transdutores, permitindo a demonstração prática do efeito estudado.

Entre as vantagens observadas, destaca-se a simplicidade de montagem, já que os módulos utilizados dispensam a confecção de uma placa de circuito impresso (PCB) dedicada. Além disso, a compatibilidade com fontes de alimentação de 12 V e a utilização de jumpers

para as conexões elétricas tornam o processo de integração mais rápido e acessível. Outro ponto positivo é o baixo custo, fator essencial para viabilizar a aplicação em ambientes educacionais, especialmente no ensino médio e na graduação, onde a prioridade é a demonstração clara do fenômeno.

No entanto, algumas limitações foram identificadas. Por se tratar de um kit modular e não de um sistema otimizado, há restrições quanto à estabilidade do campo acústico, o que pode comprometer a levitação de partículas maiores ou por longos períodos de tempo. Outro aspecto é a necessidade de ajustes manuais frequentes, principalmente no posicionamento dos transdutores e na calibração da frequência, fatores que exigem atenção do usuário para que o experimento funcione corretamente.

Ao relacionar esses pontos com a teoria apresentada no início do trabalho, percebe-se que o kit atende satisfatoriamente ao propósito de demonstrar a levitação acústica de forma didática. Embora não possua a precisão de sistemas labororiais avançados, cumpre a função de evidenciar a formação de ondas estacionárias e a influência da ressonância no aprisionamento de partículas. Assim, o protótipo escolhido representa um equilíbrio entre simplicidade, acessibilidade e eficácia, com prós que se sobrepõem às limitações dentro do escopo educacional proposto.

O kit utilizado no projeto é composto por um conjunto de transdutores piezoeletricos de 10 mm, já projetados para facilitar a montagem e garantir precisão no alinhamento. Essa etapa é fundamental para a correta formação do campo acústico, e a estrutura do kit disponibiliza suportes específicos que asseguram a fixação adequada, permitindo que todos os transdutores sejam posicionados na direção correta para garantir um funcionamento estável do sistema.

Os transdutores são conectados em polos comuns, utilizando terminais padronizados que simplificam a instalação e minimizam o risco de mau contato ou perda de sinal. Esse cuidado garante um desempenho confiável durante toda a operação, evitando falhas que possam comprometer a levitação acústica.

Para o acionamento, o kit inclui o módulo L298N, responsável por atuar como driver de potência para controlar os transdutores. Esse componente, amplamente disponível comercialmente, possui terminais bem identificados para alimentação, saídas para os transdutores e entradas de controle, permitindo integração direta com microcontroladores de forma prática e eficiente.

A alimentação do sistema é fornecida por uma fonte padrão de 12 V e 5 A, especificada para atender plenamente às demandas energéticas do conjunto sem risco de sobrecarga. Além

disso, por ser um modelo de fácil aquisição no mercado, não requer adaptações adicionais, contribuindo para a simplicidade e reproduzibilidade do projeto.

Por fim, o kit possibilita ajustes na distância e no ângulo dos transdutores, recurso que permite modificar o campo acústico e a posição dos pontos de levitação. Essa flexibilidade amplia a versatilidade do sistema, tornando-o adequado para demonstrações didáticas e experimentos acadêmicos, com diferentes configurações de levitação e análises experimentais.

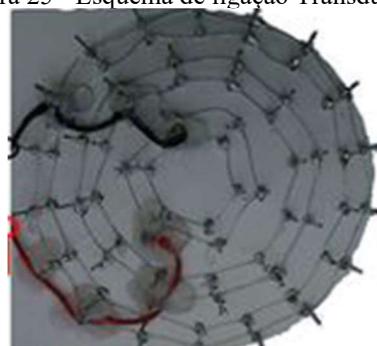
Figura 24 - Campo acústico.



Fonte: [12].

A interface elétrica do sistema foi projetada para garantir compatibilidade com plataformas de microcontroladores, como o Arduino e dispositivos similares. Essa integração simplificada possibilita a geração do sinal ultrassônico na frequência de 40 kHz e o controle completo das configurações do kit sem a necessidade de circuitos adicionais complexos, tornando o processo de operação mais acessível e eficiente.

Figura 25 - Esquema de ligação Transdutores.



Fonte: [11].

4.3 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO INICIAL

Com auxílio de outros materiais como estanho, ferro de solda e jumpers, as conexões foram feitas ao circuito (Arduino, L298N e Transdutores). Primeiramente vamos conectar o Arduino ao módulo L298N, com o auxílio de jumpers ligaremos as conexões A0, A1, A2 e A3

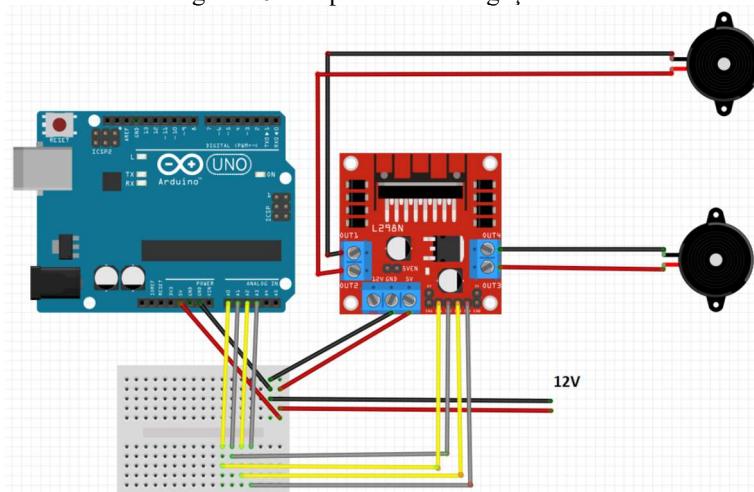
do Arduino as portas IN1, IN2, IN3 e IN4 respectivamente, dessa forma o módulo, que tem controle duplo, usará todos os seus recursos no acionamento dos 76 transdutores que estarão, então, sob comando direto do módulo L298N. Ainda será preciso que conectemos as portas GND (ground ou 0V) e 5V ao módulo, fazendo com que o GND do Arduino esteja em comum com o de uma fonte de alimentação externa, 12V, ao fim, chegaremos a um circuito similar ao da Figura 26.

A construção do circuito exige alguns materiais básicos, como estanho e ferro de solda, que são indispensáveis para realizar conexões permanentes entre os componentes. O processo consiste em aquecer o estanho com o ferro de solda para formar uma ligação elétrica sólida entre os terminais dos dispositivos e os fios condutores, sendo recomendável o uso de um bom fluxo de solda para facilitar a operação e garantir a qualidade das conexões.

Para as ligações temporárias e ajustes no protótipo, utilizam-se jumpers, que permitem realizar modificações rápidas e práticas sempre que necessário. Além disso, é essencial garantir a correta interligação dos pontos de referência elétricos: o GND do Arduino deve ser conectado ao GND da fonte de alimentação externa de 12 V, assegurando que todos os módulos compartilhem o mesmo potencial de referência. Caso essa etapa não seja cumprida adequadamente, podem ocorrer falhas de comunicação entre o Arduino e o módulo L298N, comprometendo o funcionamento dos transdutores.

Ao término dessa etapa, o circuito deve corresponder ao diagrama ilustrado na Figura 26, sendo altamente recomendável verificar visualmente todas as conexões antes de energizar o sistema, de modo a confirmar que a montagem está correta e segura. Por fim, após concluir a parte elétrica, procede-se à programação do Arduino, responsável por enviar os sinais de controle adequados ao módulo L298N para que o sistema opere conforme o planejado.

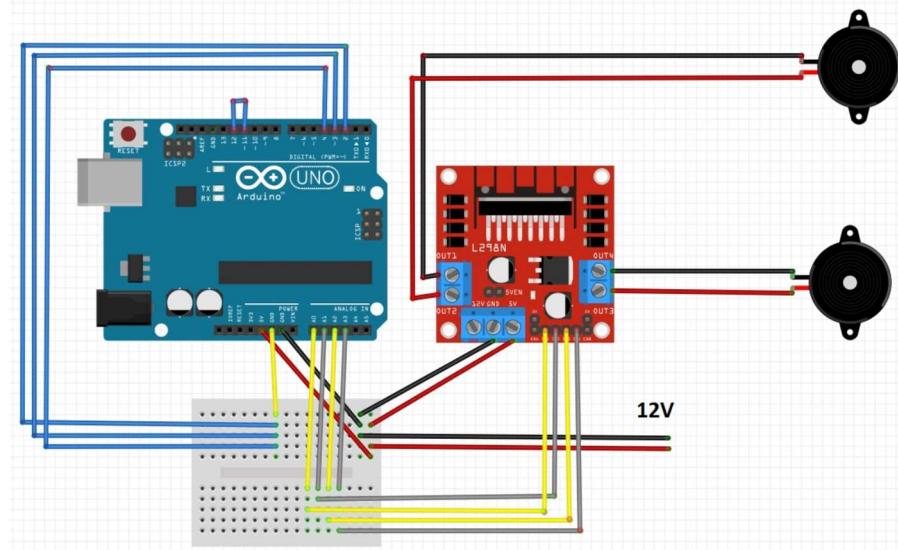
Figura 26 - Esquemático de ligação do circuito.



Fonte: O autor.

Ainda, será preciso que os pinos digitais D2, D3 e D4 sejam conectados ao aterramento, com a finalidade de fixar o nível de tensão que controla a intensidade dos campos acústicos de levitação. Ainda será preciso interligarmos os pinos, também digitais, D11 e D12, para que assim, possamos manter a integridade da porta do Arduino, que é de baixa impedância. Seguindo todos os passos, chegaremos ao circuito da Figura 27.

Figura 27 - Circuito final.



Fonte: O autor.

Vale ressaltar que na Figura 27, as ligações que vão do módulo L298N são meramente ilustrativas, serão usados 76 transdutores.

O código implementado tem como objetivo controlar um levitador acústico utilizando um microcontrolador AVR, como o Arduino Uno. O levitador acústico funciona por meio da geração de ondas ultrassônicas que interferem entre si, formando nós de pressão no ar. Pequenos objetos colocados nesses nós podem ser suspensos, devido à diferença de pressão gerada pelas ondas sonoras.

No projeto, os transdutores ultrassônicos são controlados pelo microcontrolador, que altera a fase e a sequência dos sinais elétricos enviados aos transdutores, criando os padrões necessários para formar os nós de pressão. Para isso, o código define uma tabela de animação, em que cada linha representa um quadro (frame) do padrão acústico e cada coluna representa o estado de saída de cada pino do microcontrolador. Esses padrões determinam quais transdutores estão ativos em cada instante, permitindo a formação de regiões estáveis de levitação.

O controle do tempo é crítico nesse tipo de aplicação. O código utiliza pequenas instruções de atraso (nó) para garantir que os sinais sejam emitidos com precisão, mantendo a frequência ultrassônica constante. Além disso, o microcontrolador gera um sinal de sincronismo

de 40 kHz, garantindo que todos os transdutores operem em fase correta. Essa sincronização é fundamental para manter a estabilidade dos objetos levitados.

O sistema também possui botões de controle, permitindo a interação manual. Por meio desses botões, o usuário pode avançar ou retroceder nos frames da tabela de animação, alterando a posição ou o formato do padrão acústico. Dessa forma, é possível movimentar os objetos levitados de forma controlada.

Para otimizar o desempenho, o código desativa periféricos do microcontrolador que não são necessários, como ADC, SPI, TWI e Timer0, reduzindo ruído e consumo de energia, além de garantir maior precisão na geração das ondas ultrassônicas.

Em resumo, o código combina a geração de sinais ultrassônicos, controle preciso de tempo, sincronização de transdutores e interação por botões, possibilitando a levitação e movimentação de objetos no ar de maneira controlada. Esse sistema demonstra o princípio físico da levitação acústica, em que a manipulação de ondas sonoras é utilizada para criar forças capazes de sustentar pequenos objetos contra a gravidade.

4.4 IMPRESSÃO 3D DA ESTRUTURA

Inicialmente será preciso fazer a impressão das partes em 3D, que darão forma e lugar aos componentes eletrônicos que compõe o circuito. Essas partes impressas, também tem a responsabilidade de alinhar a direcividade da irradiação sonora dos transdutores, criando um campo acústico controlado, como na Figura 24.

Ao obtermos as impressões passaremos para etapa de posicionar o conjunto de 76 transdutores e com ajuda de um palito, verificar seu alinhamento, garantindo que está com sua direcividade voltada para dentro do campo acústico (delimitado pelos limites estruturais dos suportes impressos em 3D), Figura 25. Feito isso, conectaremos os polos comuns dos transdutores e faremos sua ligação ao circuito do módulo L298N e a uma fonte de alimentação externa de 5 amperes, que fornecerá o sinal oscilante a ser disperso pelos componentes.

4.4.1 Desenho da estrutura 3d

Visando a organização e a proteção dos componentes do sistema de levitação acústica, foi projetada uma estrutura tridimensional específica para o modelo. O desenvolvimento ocorreu em ambiente CAD, possibilitando a definição precisa das dimensões e a adaptação para a fixação dos transdutores ultrassônicos, da placa de controle e da fonte de alimentação.

A estrutura foi concebida para ser impressa em 3D, dispensando a necessidade de suportes adicionais durante a fabricação, o que otimiza o processo e reduz o consumo de material. Além de oferecer sustentação mecânica, o projeto priorizou a disposição ergonômica dos elementos, garantindo fácil acesso para manutenção e ajustes.

Figura 28 – Partes impressas em 3D.



Fonte: O Autor.

4.4.2 Impressão das partes 3d

A impressão das partes em 3D é crucial para a criação de uma estrutura que não apenas acomode os componentes eletrônicos, mas também otimize o desempenho acústico. É importante escolher o material certo para a impressão, pois ele pode afetar tanto a durabilidade da estrutura quanto suas propriedades acústicas. Materiais como PLA ou ABS são comuns, mas se você precisar de resistência térmica ou acústica, pode considerar filamentos especiais.

O resultado final consistiu em um gabinete leve, resistente e de baixo custo, capaz de acomodar todos os módulos do levitador acústico de forma integrada e segura, representando uma solução eficiente para experimentos acadêmicos e aplicações didáticas conforme Figura 29.

Figura 29 - Estrutura montada.



Fonte: O Autor.

4.5 PROJETO ELETRÔNICO ADICIONAL

O posicionamento do transdutor é um aspecto crítico em sistemas que utilizam ondas sonoras para levitação, como no caso do projeto mencionado.

O desenvolvimento de um levitador acústico apresenta diversas dificuldades técnicas que envolvem tanto a parte física quanto a eletrônica do sistema. A precisão na colocação dos transdutores é essencial, pois a formação dos nós de pressão depende diretamente da interferência das ondas sonoras. Pequenos desalinhamentos ou variações na distância entre os transdutores podem comprometer a estabilidade dos objetos levitados, tornando a levitação instável ou mesmo impossível. Além disso, a fase e a frequência dos sinais enviados aos transdutores devem ser controladas com extrema precisão, já que qualquer erro na temporização ou variação na frequência pode deslocar os nós de pressão e impedir que os objetos permaneçam suspensos. O ambiente também influencia significativamente o desempenho do sistema, uma vez que reflexões indesejadas das ondas ultrassônicas, correntes de ar ou interferência de outros equipamentos eletrônicos podem afetar os padrões de pressão, exigindo ajustes experimentais constantes.

Outro desafio está relacionado às limitações do microcontrolador, que precisa gerar sinais ultrassônicos de alta frequência de forma rápida e sincronizada. Microcontroladores de baixo custo podem apresentar restrições de memória, velocidade de processamento e número

de saídas digitais, dificultando a implementação de padrões complexos de levitação. Além disso, o sistema é sensível a perturbações externas, como vibrações ou movimentos próximos, o que exige uma estrutura mecânica estável e rígida, bem como calibração constante. O funcionamento contínuo de múltiplos transdutores também pode gerar aquecimento nos componentes, tornando necessária a escolha adequada de fontes de alimentação e cuidados com dissipação de calor para evitar falhas. Por fim, a visualização do efeito é naturalmente desafiadora, já que as ondas ultrassônicas são inaudíveis e invisíveis, o que obriga o uso de objetos de teste muito leves ou instrumentos específicos para verificar se os padrões de pressão estão corretos.

4.5.1 Alinhamento e operação

Durante o desenvolvimento do projeto, identificou-se que a precisão no alinhamento dos transdutores era um fator crítico para o bom funcionamento do levitador acústico. Inicialmente, observou-se que pequenas inclinações ou desalinhamentos comprometiam a convergência das ondas ultrassônicas, resultando em campos de pressão irregulares. Esses campos não uniformes impediam a formação estável dos nós estacionários, o que dificultava a levitação adequada das partículas.

Para solucionar esse problema, foi adotado um método de posicionamento mais rigoroso dos transdutores, garantindo que todos estivessem alinhados de forma paralela e emitindo as ondas no mesmo eixo. Além disso, foi utilizado um suporte com ajustes finos para controlar o ângulo de emissão, permitindo calibrar a direção das ondas de modo a obter um campo acústico estável e simétrico. Essa solução resultou em uma levitação mais eficiente e confiável, comprovando a importância do alinhamento e do ângulo de emissão para o sucesso do experimento conforme Figura 2.

4.5.2 Distância entre os transdutores

Para garantir o funcionamento adequado do levitador acústico, a distância entre os transdutores deve ser otimizada, pois, se estiverem muito próximos, a interferência pode causar a anulação das ondas, comprometendo a formação das regiões de pressão necessárias. Por outro lado, se estiverem muito afastados, a intensidade das ondas acústicas pode ser insuficiente para criar a pressão necessária para a levitação. Essa distância também deve ser calculada com base na frequência das ondas sonoras geradas, pois, para frequências específicas, há uma relação direta entre a distância e o comprimento de onda, e essa relação deve ser considerada para garantir que os nós e antinodos se formem corretamente no espaço entre os transdutores.

A superfície onde os transdutores estão montados deve ser rígida e estável para evitar vibrações indesejadas que possam interferir no funcionamento do sistema. Além disso, o ambiente ao redor dos transdutores também afeta seu desempenho, uma vez que materiais absorventes ou reflexivos podem alterar a propagação das ondas sonoras; por esse motivo, é importante considerar o tratamento acústico do espaço.

Em alguns casos, utilizar uma configuração em matriz, conhecida como *array*, composta por múltiplos transdutores, pode melhorar a eficiência do sistema, permitindo a criação de padrões de onda mais complexos e direcionais, o que aumenta a capacidade de levitação. Por fim, a possibilidade de ajustar diferentes transdutores para trabalhar em frequências ligeiramente diferentes pode criar interferência construtiva, potencializando o efeito de levitação e tornando o sistema ainda mais eficiente.

4.5.3 Interface com o usuário por botões e tela LCD

Foi implementada uma interface simples e funcional para o usuário, composta por botões de controle e uma tela LCD 16x2. Os botões permitiram alterar os quadros de animação acústica e reiniciar o sistema, enquanto o display exibia informações como número do *frame*, amplitude aproximada e frequência de operação em tempo real.

A Figura 30 apresenta o LCD em funcionamento, mostrando os parâmetros durante os testes e a Figura Y mostra a implementação física do circuito e das ligações. Essa interface torna o protótipo autônomo, dispensando o uso de um computador externo para monitoramento e controle.

Figura 30 - LCD em funcionamento.



Fonte: O Autor.

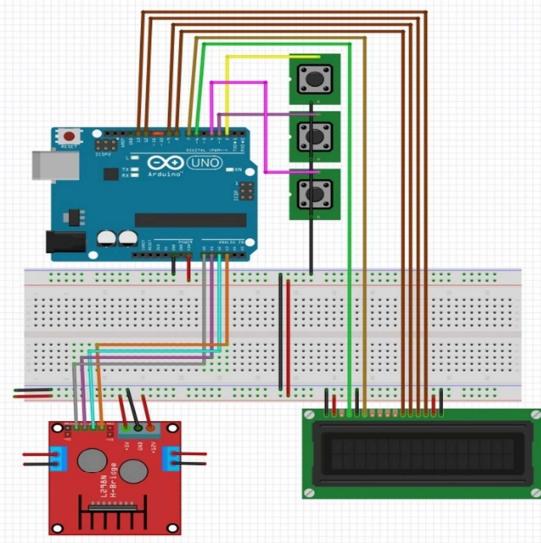
4.5.4 Justificativa da interface e do modelo LCD

A escolha do modelo LCD 16x2 se deve à sua ampla disponibilidade no mercado, baixo custo e fácil integração com o Arduino. Ele oferece espaço suficiente para exibir em tempo real os dados essenciais do experimento (*frame*, frequência e amplitude) com boa visibilidade em diferentes condições de iluminação.

Essa interface é fundamental para:

- Permitir o acompanhamento direto do funcionamento do protótipo;
- Facilitar ajustes rápidos sem necessidade de reprogramar o microcontrolador;
- Tornar o sistema mais didático e acessível para uso em ambientes acadêmicos.

Figura 31 - Implementação física do circuito LCD.



Fonte: O Autor.

O código da Figura 32 ilustra a inicialização do display e a atualização dinâmica das informações.

Figura 32 - Código da tela LCD.

```
#include <LiquidCrystal.h>

LiquidCrystal lcd(12, 13, 4, 5, 6, 7); // RS, E, D4, D5, D6, D7

void setup() {
  lcd.begin(16,2);
  lcd.print("Frame: 0");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Amp: 0 Freq: 40k");
}

void atualizarLCD(byte frame, byte amp) {
  lcd.setCursor(7,0);
  lcd.print(frame);
  lcd.print(" ");

  lcd.setCursor(5,1);
  lcd.print("    "); // limpa anterior
  lcd.setCursor(5,1);
  lcd.print(amp);
  lcd.print(" V Freq:40k");
}
```

Fonte: O Autor.

4.5.5 Controle do PWM e leitura dos botões

O Timer1 do Arduino Uno foi configurado para gerar um sinal PWM estável a 40 kHz, necessário para o acionamento correto dos transdutores. Os botões conectados aos pinos digitais permitiram navegar entre diferentes frames acústicos, possibilitando ajustar a amplitude e os padrões de onda durante os testes, sendo estes:

- Próximo (D2): avança para o próximo frame, alterando o padrão de excitação dos transdutores;
- Anterior (D3): retorna ao frame anterior;
- Reset (D4): reinicia o sistema para o frame inicial.

O código do controle de PWM é apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Código Gerador de Frequência.

```
// Timer1 Fast PWM 40kHz
noInterrupts();
TCCR1A = bit(WGM10) | bit(WGM11) | bit(COM1B1);
TCCR1B = bit(WGM12) | bit(WGM13) | bit(CS10);
OCR1A = (F_CPU / 40000L) - 1;
OCR1B = (F_CPU / 40000L) / 2;
interrupts();
```

Fonte: O Autor.

5 RESULTADOS

O protótipo final do levitador acústico foi desenvolvido integrando todos os módulos eletrônicos, a estrutura mecânica impressa em 3D e a interface homem-máquina, resultando em um sistema compacto, funcional e de baixo custo. Após a montagem, foram realizados testes para validar o desempenho e comprovar a capacidade de levitação acústica proposta neste trabalho.

Para o seu funcionamento, empregou-se um microcontrolador Arduino Uno, responsável pela geração de sinais PWM na frequência de 40 kHz, utilizando o Timer1 para excitar os transdutores ultrassônicos. Esses transdutores foram conectados a um estágio de potência baseado no módulo L298N, acionado pelas linhas digitais do PORTC.

A interação com o usuário ocorreu por meio de uma interface homem-máquina composta por um display LCD 16×2, operando em modo de 4 bits, e botões destinados à seleção dos diferentes padrões de excitação. Toda a estrutura física foi projetada e fabricada em impressora 3D, proporcionando organização do cabamento, acomodação adequada dos módulos e robustez ao conjunto.

5.1 VALIDAÇÃO POR ENSAIOS

O procedimento experimental iniciou-se com a energização do Arduino, alimentado com tensão de +5 V, e do estágio de potência, momento em que o display LCD exibiu a mensagem “Frame: 0 / Frequência: 40k”. Em seguida, foi realizado o ajuste do contraste por meio da regulação do potenciômetro (VO) até que a leitura no display apresentasse nitidez adequada. Com o sistema pronto, deu-se início à etapa de levitação, posicionando-se microesferas leves, como pequenos fragmentos de isopor com diâmetro aproximado de 1 a 2 mm, na região compreendida entre os dois arranjos de transdutores ultrassônicos.

A navegação entre os diferentes padrões de excitação foi feita por meio dos botões dedicados à interface: o botão “Próximo” (D2) avançou o padrão de excitação, o botão “Anterior” (D3) permitiu o retorno ao padrão anterior, e o botão “Reset” (D4) possibilitou o retorno imediato ao frame inicial. Durante todo o processo, o display LCD atualizou em tempo real as informações referentes ao frame e à amplitude, esta última calculada a partir do índice de ativação do PORTC no firmware desenvolvido. Por fim, observou-se visualmente a estabilidade das partículas levitadas, registrando-se fotografias e vídeos para documentar o comportamento em diferentes condições de excitação.

Figura 34 - Objetos em Suspensão.



Fonte: O Autor.

Durante os experimentos, foi possível obter levitação estável, com formação de pontos de equilíbrio bem definidos, os chamados nós acústicos, que mantiveram as microesferas suspensas de maneira contínua sob diferentes padrões de excitação.

A resposta aos comandos fornecidos pelos botões mostrou-se confiável, uma vez que o firmware implementou tratamento de debounce por limiar (BUTTON_SENS), evitando a troca de frames de forma acidental. Paralelamente, a interface homem-máquina revelou-se bastante informativa, já que o display LCD apresentou em tempo real tanto o número do frame ativo quanto o valor da amplitude, métrica interna proporcional à quantidade de bits ativos no padrão de saída, o que possibilitou a reprodução dos testes com precisão. Por fim, verificou-se que o sistema operou consistentemente na frequência nominal de 40 kHz, conforme especificado no código do Timer1 e compatível com a faixa de operação dos transdutores empregados.

5.2 CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO E VALIDAÇÃO

Para validar o atendimento ao objetivo do trabalho, foram estabelecidos critérios de desempenho que contemplaram o funcionamento do arranjo acústico, a interface de controle e

a viabilidade técnica da solução. Verificou-se que o sistema manteve objetos leves em levitação contínua por tempo suficiente para registro, com duração mínima de 30 segundos, comprovando a estabilidade do fenômeno. O controle pelo usuário, por meio dos botões, permitiu a alteração dos padrões de excitação com atualização imediata do estado no display LCD, garantindo uma operação intuitiva. Além disso, a reprodutibilidade foi confirmada pela possibilidade de repetir a levitação após ciclos de desligamento e religamento, bem como durante a alternância dos diferentes frames de excitação.

A proposta atendeu também ao requisito de baixa complexidade e custo, utilizando componentes de ampla disponibilidade, como o Arduino Uno, o display LCD 16×2 e o driver L298N. Por fim, a integração mecânica e eletrônica foi assegurada pela montagem em uma estrutura impressa em 3D, que proporcionou organização do cabeamento e fácil acesso para ajustes. Dessa forma, o protótipo final cumpriu integralmente o objetivo central do trabalho, demonstrando a viabilidade da levitação acústica estável em conjunto com uma interface de operação simples e de baixo custo, possibilitando sua aplicação em contextos didáticos para ilustrar fenômenos como ondas estacionárias, movimento harmônico simples e energia potencial.

Figura 35 - Equipamento final em funcionamento.



Fonte: O autor.

5.3 DISCUSSÃO

O protótipo desenvolvido permite ao usuário interagir diretamente com os parâmetros de operação da levitação acústica por meio de uma interface simples e didática. O display LCD 16×2 apresenta em tempo real o frame ativo, correspondente ao padrão de excitação utilizado, além de exibir a frequência nominal de operação, fixada em 40 kHz, e a amplitude relativa aplicada aos transdutores, possibilitando o acompanhamento das variações durante os testes.

Complementando a interface, os botões de controle desempenham funções essenciais para a navegação e a repetibilidade dos experimentos: o botão “Próximo” (D2) avança para o próximo frame, modificando a forma do campo acústico; o botão “Anterior” (D3) retorna ao frame anterior, permitindo a observação de diferentes padrões; e o botão “Reset” (D4) reinicia o sistema para a configuração inicial, assegurando estabilidade e consistência na execução dos ensaios.

Cada botão do protótipo tem impacto direto no comportamento do sistema e na levitação das partículas permitindo a mudança de frame, recurso que altera o padrão de ativação dos transdutores e, consequentemente, modifica a posição e o formato das regiões de pressão responsáveis por manter as partículas suspensas. Além disso, oferece a possibilidade de ajuste da amplitude relativa, parâmetro que influencia diretamente a intensidade do campo acústico e pode aumentar ou reduzir a estabilidade da levitação conforme as condições do experimento. Por fim, o protótipo conta com a função de reset, que retorna o sistema ao estado inicial, eliminando quaisquer efeitos remanescentes de configurações anteriores e possibilitando a repetição dos testes de maneira controlada e padronizada.

A análise do protótipo evidenciou alguns pontos fortes, como a simplicidade de reprodução do sistema, a interface clara e a possibilidade de variar os padrões de excitação diretamente no próprio equipamento.

Contudo, foram identificadas algumas limitações, uma vez que o valor da amplitude exibido corresponde apenas a um índice interno derivado do padrão digital e não a uma medição física absoluta da amplitude acústica.

Nesse sentido, futuras versões do projeto podem incorporar medições instrumentais, como microfones ultrassônicos ou sondas acústicas, para permitir uma caracterização quantitativa mais precisa do campo sonoro. Além disso, há potencial para extensões, incluindo o controle mais refinado da fase em cada padrão, o registro automático dos ensaios e a avaliação detalhada da relação entre a estabilidade da levitação e os diferentes frames de excitação.

Figura 36 - Equipamento final montado.



Fonte: O autor.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e a análise de um levitador acústico baseado em ondas ultrassônicas, tomando como referência uma arquitetura em miniatura. Durante o projeto, constatou-se que a precisão no alinhamento e na sincronização de fase dos transdutores é fator crítico para a formação de ondas estacionárias capazes de sustentar pequenas partículas, conforme previsto pela teoria de levitação acústica. O controle eletrônico, realizado com Arduino Uno e estágio de potência L298N, gerou o sinal ultrassônico em 40 kHz, resultando em regiões de alta pressão onde as partículas permaneceram suspensas com estabilidade.

A interface didática implementada — composta por LCD 16×2 e botões de navegação — aprimorou a usabilidade do sistema para fins de ensino. No protótipo, o LCD exibiu o frame ativo (padrão de excitação) e um índice de amplitude relativa, enquanto a frequência nominal foi mantida em 40 kHz. Essa combinação permitiu ao usuário acompanhar, em tempo real, a relação entre os comandos (botões) e o deslocamento da partícula entre nós da onda estacionária, facilitando ajustes práticos e reforçando a compreensão conceitual.

Os resultados demonstraram que a levitação acústica foi obtida de forma segura e controlada, possibilitando o manuseio de pequenas partículas sem contato físico e evidenciando potenciais aplicações em química, biologia, física experimental e micro fabricação. Do ponto de vista pedagógico, o arranjo experimental tornou visíveis conceitos por vezes abstratos (como nós/ventres, movimento harmônico simples e energia potencial), promovendo a integração entre teoria e prática em ambiente de laboratório.

Conclui-se, portanto, que o projeto atingiu seus objetivos técnicos e educacionais, ao oferecer um sistema acessível, funcional e didático, no qual o monitoramento interativo (LCD + botões) potencializou o aprendizado e a reproduzibilidade dos experimentos de levitação acústica.

REFERÊNCIAS

- ARDUINO.** Uno Rev3 – Documentation. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>. Acesso em: 7 set. 2025.
- CARBINATTO, B.** Levitação acústica pode otimizar produção de remédios. USP, 2018. Disponível em: <http://aun.webhostusp.sti.usp.br/index.php/2018/05/23/levitacao-acustica-pode-otimizar-producao-de-remedios/>. Acesso em: 12 jul. 2022.
- CIENTISTAS criam aparelho capaz de fazer “medicamentos flutuantes”.** Revista Galileu, 2012. Disponível em: <https://revistagalileu.globo.com/Revista/Common/0,,EMI319182-17777,00.html>. Acesso em: 12 jul. 2022.
- CIFERTECH.** How to Make an Ultrasonic Levitator Using Arduino. Arduino Project Hub, 22 ago. 2019. Disponível em: <https://projecthub.arduino.cc/CiferTech/how-to-make-an-ultrasonic-levitator-using-arduino-77cf94>. Acesso em: 7 set. 2025.
- DE LUCA, A.** Pandemia impacta produção de microchips e faz preço de eletrônicos subir. CNN Brasil, 2022. Disponível em: <http://www.cnnbrasil.com.br/business/pandemia-impacta-producao-de-microchips-e-faz-preco-de-eletroeletronico-subir/>. Acesso em: 12 jul. 2022.
- ELETROGATE.** Levitação ultrassônica com Arduino. 17 maio 2022. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/levitacao-ultrassonica-com-arduino/>. Acesso em: 7 set. 2025.
- GOMES, P. M.** Caracterização de canal acústico baseado em transdutores piezoelétricos. Relatório (Iniciação Científica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: http://www.pucrio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio_resumo2017/relatorios_pdf/ctc/MEC/M_ECPedro_Gomes.pdf. Acesso em: 12 jul. 2022.
- INSTITUTO FEDERAL DE SÃO PAULO.** Levitação acústica. Anais do CONEPT/CONICT (OCS). Disponível em: <https://ocs.ifsp.edu.br/conept/iv-conept/paper/view/3935/707>. Acesso em: 7 set. 2025.
- JENSEN, M. H.** How to Compute the Acoustic Radiation Force. COMSOL Blog, 29 jan. 2015. Disponível em: <https://www.comsol.com/blogs/how-to-compute-the-acoustic-radiation-force>. Acesso em: 7 set. 2025.
- LIMA, E. B. de.** Projeto de um transdutor de Langevin para aplicação em levitação acústica. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – Universidade Federal de Alfenas, Campus Arapiraca, 2018.
- MARZO, A.; DRINKWATER, B. W.; SUBRAMANIAN, S.** Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects. *Nature Communications*, v. 6, n. 8661, 2015. DOI: 10.1038/ncomms9661. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ncomms9661>. Acesso em: 7 set. 2025.
- MURATA.** Data Sheet MA40S4S/MA40S4R – Ultrasonic Sensor (Open Type). 2020. Disponível em: https://www.murata.com/-/media/webrenewal/products/sensor/ultrasonic/open/datasheet_maopn.ashx. Acesso em: 7 set. 2025.
- NETO, J. P. L.** Força e torque de radiação sobre uma partícula viscoelástica em um meio fluido. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.
- PÉCORA, J. D.; GUERISOLI, D. Z.** Endodontia. 2004. Disponível em: <http://www.forp.usp.br/restauradora/us01.htm>. Acesso em: 12 jul. 2022.

RAMALHO ARVATE, J.; LOPES MARANGONI, M. Uma relação entre crescimento econômico, aumento de produtividade e desenvolvimento tecnológico. Jusbrasil, 2016. Disponível em: <http://mlopesmarangoni.jusbrasil.com.br/artigos/337892854/uma-relacaoentre-crescimento-economico-aumento-de-produtividade-e-desenvolvimentotecnologico>. Acesso em: 12 jul. 2022.

ROBOTSHOP. Acoustic Levitator Kit. Disponível em: <https://www.robotshop.com/products/acoustic-levitator-kit>. Acesso em: 7 set. 2025.

SORENSEN, R. do N. Levitação acústica e ensino de ondas estacionárias. IFSP – XI CONICT, 2020/2021. Disponível em: <https://ocs.ifsp.edu.br/conict/xiconict/paper/download/7116/2031>. Acesso em: 7 set. 2025.

STMICROELECTRONICS. L298 – Dual full-bridge driver (Datasheet). 06 out. 2023. Disponível em: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf>. Acesso em: 7 set. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. Pesquisadora da UFU é destaque na engenharia com levitação de objetos através do som. 26 mar. 2020. Disponível em: <https://comunica.ufu.br/noticias/2020/03/pesquisadora-da-ufu-e-destaque-na-engenharia-com-levitacao-de-objetos-atraves-do>. Acesso em: 7 set. 2025.

UPNALAB. Acoustic Levitator. Instructables, 2017. Disponível em: <https://www.instructables.com/Acoustic-Levitator/>. Acesso em: 7 set. 2025.

VIEIRA, R. F. Conhecendo a piezoelectricidade: uma nova forma de geração de energia elétrica. Núcleo do Conhecimento, 2017. Disponível em: <http://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/geracao-deenergia-eletrica>. Acesso em: 12 jul. 2022.

WIJAYA, H.; et al. Two-Dimensional Manipulation in Mid-Air Using a Single Transducer and a Reflector. *Micromachines*, v. 10, n. 6, p. 417, 2019. DOI: 10.3390/mi10060417. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6523525/>. Acesso em: 7 set. 2025.

WIKIPÉDIA. Piezoelectricidade. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricidade>. Acesso em: 7 set. 2025.

APÊNDICE A: CÓDIGO ARDUINO

```

#include <avr/sleep.h>
#include <avr/power.h>
#include <LiquidCrystal.h>

// ===== LCD paralelo (4 bits) =====
/*
Fiação típica:
RS -> D12
EN -> D13
D4 -> D4
D5 -> D5
D6 -> D6
D7 -> D7
*/
LiquidCrystal lcd(12, 13, 4, 5, 6, 7);
// =====

#define N_PORTS 1
#define N_DIVS 24
#define N_FRAMES 24

// Esperas com NOPs (mantidas)
#define WAIT_LOT(a) __asm__ __volatile__("nop"); __asm__ __volatile__("nop"); __asm__ \
__volatile__("nop"); __asm__ __volatile__("nop"); __asm__ __volatile__("nop")
#define WAIT_MID(a) __asm__ __volatile__("nop"); __asm__ __volatile__("nop"); __asm__ \
__volatile__("nop"); __asm__ __volatile__("nop"); __asm__ __volatile__("nop")
#define WAIT_LIT(a) __asm__ __volatile__("nop"); __asm__ __volatile__("nop"); __asm__ \
__volatile__("nop"); __asm__ __volatile__("nop"); __asm__ __volatile__("nop")

#define OUTPUT_WAVE(pointer, d) PORTC = pointer[(d)*N_PORTS + 0]

// ===== Botões =====
#define N_BUTTONS 3
#define STEP_SIZE 1
#define BUTTON_SENS 2500
// D2=Menos, D3=Mais, D8=Reset
const uint8_t BTN_D2_MASK = 0b00000100; // PIND bit2
const uint8_t BTN_D3_MASK = 0b00001000; // PIND bit3
const uint8_t BTN_D8_MASK = 0b00000001; // PINB bit0
// =====

static byte frame = 0;

// Mesma tabela de animação
static byte animation[N_FRAMES][N_DIVS] = {
{0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa}
},

```



```

while ((PINB & 0b00001000) && --guard) { /* espera ir a LOW */ }
// Se guard chegar a zero, seguimos sem sync (modo tolerante).

// ===== Varredura das divisões =====
byte buttonsPortD = 0;
byte buttonsPortB = 0;

// D0..D7
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 0); buttonsPortD = PIND; WAIT_LIT();
// B0..B5
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 1); buttonsPortB = PINB; WAIT_MID();

// Mascara de "algum botao" (D2/D3/D8) – PULLUP: 1=solto, 0=pressionado
bool anyButtonPressed =
    ((buttonsPortD & (BTN_D2_MASK | BTN_D3_MASK)) != (BTN_D2_MASK |
    BTN_D3_MASK)) ||
    ((buttonsPortB & BTN_D8_MASK) != BTN_D8_MASK);

// Estados individuais (já invertidos: true=pressionado)
buttonPressed[0] = !(buttonsPortD & BTN_D2_MASK); // D2
buttonPressed[1] = !(buttonsPortD & BTN_D3_MASK); // D3
buttonPressed[2] = !(buttonsPortB & BTN_D8_MASK); // D8

// Demais divisões (mantidas)
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 2); WAIT_MID();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 3); WAIT_MID();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 4); WAIT_MID();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 5); WAIT_MID();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 6); WAIT_MID();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 7); WAIT_MID();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 8); WAIT_LOT();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 9); WAIT_LOT();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 10); WAIT_LOT();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 11); WAIT_LOT();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 12); WAIT_LOT();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 13); WAIT_LOT();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 14); WAIT_LOT();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 15); WAIT_LOT();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 16); WAIT_LOT();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 17); WAIT_LOT();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 18); WAIT_LOT();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 19); WAIT_LOT();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 20); WAIT_LOT();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 21); WAIT_LOT();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 22); WAIT_LOT();
OUTPUT_WAVE(emittingPointer, 23); /* sem WAIT aqui, como no original */

// ===== Debounce e ações =====
if (anyButtonPressed) {
    ++buttonCounter;
    if (buttonCounter > BUTTON_SENS) {
        buttonCounter = 0;

        if (buttonPressed[0]) { // D2 = Menos (voltar)
            if (frame < STEP_SIZE) frame = N_FRAMES - 1;
            else frame -= STEP_SIZE;
        } else if (buttonPressed[1]) { // D3 = Mais (avançar)
            if (frame >= N_FRAMES - STEP_SIZE) frame = 0;
            else frame += STEP_SIZE;
        } else if (buttonPressed[2]) { // D8 = Reset

```

```
    frame = 0;
}

// Atualiza ponteiro do frame atual
emittingPointer = &animation[frame][0];

// ---- Atualização do LCD (rápida) ----
// (Item 6) Amplitude: considerar apenas os 4 bits (A0..A3)
byte val = emittingPointer[0] & 0x0F;
uint8_t amp = 0;
amp += (val & 0x01) ? 1 : 0;
amp += (val & 0x02) ? 1 : 0;
amp += (val & 0x04) ? 1 : 0;
amp += (val & 0x08) ? 1 : 0;

lcd.setCursor(0,0); lcd.print("Frame: ");
if (frame < 10) { lcd.print('0'); } // estética opcional
lcd.print(frame);
lcd.print(" ");

lcd.setCursor(0,1);
// Mantendo estilo do original: "Freq:40k Amp:X"
lcd.print("Freq:40k Amp:");
lcd.print(amp);
lcd.print(" ");
}

} else {
buttonCounter = 0;
}
}
```