



UFRJ

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ALEX DE SÁ OLIVEIRA

UMA ANALOGIA ENTRE SOM E LUZ – LEVITAÇÃO ACÚSTICA E LEVITAÇÃO
ÓPTICA

Rio de Janeiro

2022

ALEX DE SÁ OLIVEIRA

UMA ANALOGIA ENTRE SOM E LUZ – LEVITAÇÃO ACÚSTICA E LEVITAÇÃO
ÓPTICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Licenciatura em Física, da UFRJ, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Licenciado em Física.

Orientador: Roberto Affonso Pimentel Jr.

Rio de Janeiro

2022

CIP - Catalogação na Publicação

O48a Oliveira, Alex de Sá
 Uma analogia entre som e luz: levitação acústica
 e levitação óptica / Alex de Sá Oliveira. -- Rio de
 Janeiro, 2022.
 85 f.

 Orientador: Roberto Affonso Pimentel Jr..
 Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
 Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto
 de Física, Licenciado em Física, 2022.

 1. Som. 2. Luz. 3. Levitação acústica. 4.
 Levitação óptica. 5. Analogia. I. Pimentel Jr.,
 Roberto Affonso, orient. II. Título.

ALEX DE SÁ OLIVEIRA

UMA ANALOGIA ENTRE SOM E LUZ – LEVITAÇÃO ACÚSTICA E LEVITAÇÃO
ÓPTICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Licenciatura em Física, da UFRJ, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Licenciado em Física.

Rio de Janeiro, __ de _____ de ____

BANCA EXAMINADORA

Germano Maioli Penello
UFRJ

Reinaldo Faria de Melo e Souza
UFF

Vitorvani Soares
UFRJ

Dedico este trabalho aos meus pais, irmãs, amigos e
aos que sempre me incentivaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares e amigos, que sempre estiveram ao meu lado contribuindo para que eu pudesse enfrentar os desafios durante o curso e ao longo da vida.

Agradeço também aos meus professores, orientadores e profissionais da área que me orientaram e me ajudaram a tornar possível a realização deste trabalho.

A todos, meu muito obrigado!

RESUMO

Este trabalho faz uma analogia entre o som e a luz, mostrando o comportamento ondulatório de ambos, além de fazer uma analogia entre levitação acústica e levitação óptica. O comportamento ondulatório do som e da luz é constatado através de experimentos de interferência, onde foi possível registrar a formação de um padrão de interferência característico de ondas. Na sequência, é feita uma explicação teórica e uma demonstração do experimento de levitação acústica, na qual se conseguiu levitar alguns objetos e calcular a pressão e a força de radiação acústica geradas pelo levitador. Também é feita uma explicação teórica e uma demonstração do experimento de levitação aerodinâmica, onde foi possível suspender um objeto sobre o fluxo de ar de um secador de cabelo e calcular a velocidade (do fluxo) necessária para isto. Posteriormente, é feita uma analogia da levitação óptica de cargas elétricas com a levitação acústica e, uma analogia da levitação óptica de dielétricos com a levitação aerodinâmica, mostrando um segundo comportamento da luz. Por fim, é apresentada uma proposta de ação pedagógica para a aplicação dos experimentos realizados neste trabalho.

Palavras-chave: Som; Luz; Levitação acústica; Levitação óptica; Analogia; Ensino de física.

ABSTRACT

This work makes an analogy between sound and light, showing the wave behavior of both, in addition to making an analogy between acoustic levitation and optical levitation. The wave behavior of sound and light is verified through interference experiments, where it was possible to register the formation of an interference pattern characteristic of waves. Next, a theoretical explanation and demonstration of the acoustic levitation experiment are made, in which it was achieved to levitate some objects and calculate the pressure and force of acoustic radiation generated by the levitator. A theoretical explanation and demonstration of the aerodynamic levitation experiment is also made, where it was possible to suspend an object over the air flow of a hair dryer and calculate the velocity (of the flow) necessary for this. Subsequently, an analogy of optical levitation of electric charges with acoustic levitation is made, and an analogy of optical levitation of dielectrics with aerodynamic levitation, showing a second behavior of light. Finally, a proposal for a pedagogical action is presented for the application of the experiments carried out in this work.

Keywords: Sound; Light; Acoustic Levitation; Optical Levitation; Analogy; Physics teaching.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Onda transversal em uma corda.....	15
Figura 2 — Onda longitudinal em uma mola.	15
Figura 3 — Representação gráfica de uma onda.....	17
Figura 4 — Onda refletida.	18
Figura 5 — Reflexão regular / Reflexão difusa.....	18
Figura 6 — Onda refratada.....	19
Figura 7 — Difração por fenda com dimensão próxima ao comprimento de onda / Difração por fenda com dimensão desproporcional ao comprimento de onda.....	20
Figura 8 — Onda polarizada.	20
Figura 9 — Interferência construtiva entre duas ondas.....	21
Figura 10 — Interferência destrutiva total entre duas ondas.....	21
Figura 11 — Diferença de fase representada pelo ângulo θ	22
Figura 12 — Interferência por diferença de caminho.	23
Figura 13 — Representação de uma onda sonora.....	24
Figura 14 — Classificação sonora.....	24
Figura 15 — Montagem do experimento.	25
Figura 16 — Imagens da realização do experimento onde é possível ver o registro da intensidade sonora em um ponto qualquer, no máximo central e num mínimo de interferência.....	26
Figura 17 — Imagem da realização do experimento onde é possível ver o registro dos níveis de intensidade sonora em função do espaço.....	27
Figura 18 — Interferência bidimensional.....	28
Figura 19 — Interferência por diferença de caminho.	28
Figura 20 — Interferência sonora.....	29
Figura 21 — Geometria da interferência.	30
Figura 22 — Distância entre máximos de intensidade.....	32
Figura 23 — Fendas por onde passará o feixe de luz.....	33
Figura 24 — Padrão de interferência (Dupla fenda óptica).	34
Figura 25 — Padrão formado pela difração de cada fenda / Padrão formado pela interferência das duas fendas.	34
Figura 26 — Interferência luminosa.	35
Figura 27 — Distância entre máximos.	36
Figura 28 — Comparação entre padrões de interferência sonora e luminosa.	37
Figura 29 — Onda eletromagnética.	37
Figura 30 — Espectro eletromagnético.....	38
Figura 31 — Onda estacionária com nós e ventres sobre pontos fixos em instantes diferentes.....	39
Figura 32 — Tubos sonoros abertos.	40
Figura 33 — Tubos sonoros fechados.	42

Figura 34 — Tubo de Kundt.	44
Figura 35 — Modelo de levitador acústico.	45
Figura 36 — Esquema da montagem do levitador acústico.	46
Figura 37 — Levitador acústico (Demonstração 1).	48
Figura 38 — Levitador acústico (Demonstração 2).	49
Figura 39 — Levitador acústico (Demonstração 3).	50
Figura 40 — Levitação aerodinâmica.	56
Figura 41 — Força de arrasto e força gravitacional agindo sobre o objeto.	58
Figura 42 — Verificando velocidade do fluido com um anemômetro.	59
Figura 43 — Tentativa de suspender dois objetos simultaneamente.	60
Figura 44 — Efeito Coanda agindo sobre um objeto centralizado.	61
Figura 45 — Efeito Coanda agindo sobre um objeto não centralizado.	62
Figura 46 — Regra da mão direita.	64
Figura 47 — Força magnética sobre um próton.	65
Figura 48 — Onda eletromagnética estacionária.	65
Figura 49 — Próton aprisionado pela força magnética em uma onda estacionária eletromagnética.	66
Figura 50 — Armadilha óptica.	71
Figura 51 — Armadilha óptica com feixe focalizado.	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
---------	--

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	DESENVOLVIMENTO	14
2.1	CONTEXTO HISTÓRICO	14
2.2	ONDAS	14
2.2.1	Propriedades das ondas	16
2.3	FENÔMENOS ONDULATÓRIOS	18
2.3.1	Reflexão	18
2.3.2	Refração	19
2.3.3	Difração	19
2.3.4	Polarização	20
2.3.5	Interferência	21
2.4	O SOM COMO UMA ONDA	24
2.4.1	Ondas sonoras	24
2.4.2	Experimento 1: Interferência sonora (dupla fenda acústica)	25
2.5	A LUZ COMO UMA ONDA	33
2.5.1	Experimento 2: Interferência luminosa (dupla fenda óptica)	33
2.5.2	Ondas eletromagnéticas	37
2.6	ONDAS ESTACIONÁRIAS	38
2.6.1	Tubos sonoros	39
2.6.1.1	Tubos abertos	39
2.6.1.2	Tubos fechados	41
2.6.2	Pressão sonora	43
2.6.3	Tubo de Kundt	43
2.7	ONDAS ESTACIONÁRIAS ACÚSTICAS	44
2.7.1	Experimento 3: Levitação acústica	44
2.7.2	Experimento 4: Levitação aerodinâmica	56
2.8	ONDAS ESTACIONÁRIAS ÓPTICAS	63
2.8.1	Levitação óptica de cargas elétricas	63
2.8.2	Força e pressão de radiação da luz	67
2.8.3	Levitação óptica de dielétricos (armadilhas ópticas)	70
2.9	A LUZ COMO PARTÍCULA	73
2.10	PROPOSTA DE AÇÃO PEDAGÓGICA	74
3	CONCLUSÃO	76
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICE A — Visita ao INMETRO	82

1 INTRODUÇÃO

Há quem diga que a luz foi a primeira entidade a surgir no universo, porém, para que Deus dissesse "Que haja a luz!", para que assim ela fosse criada, ele precisaria ter criado o som antes disso.

Brincadeiras à parte, o som e a luz são entidades presentes na natureza desde os princípios do universo, e já nos primeiros momentos de nossas vidas convivemos com elas. Juntas, estão diretamente relacionadas com dois dos nossos sentidos, que são a audição e a visão.

Talvez por serem tão presentes e tão naturais em nosso cotidiano, muitas pessoas não questionam o que são e como se comportam. A ideia de que o som é uma onda é até um pouco mais difundida, mas a natureza da luz, talvez por sua complexidade, é uma questão pouco abordada e pouco conhecida. Contudo, se bem entendidas e bem aplicadas, suas propriedades podem proporcionar muitos avanços tecnológicos e benefícios para a sociedade nas áreas da medicina, produção farmacêutica, entretenimento e comunicação, por exemplo.

Analogias e experimentos podem ser ferramentas muito interessantes para ajudar na compreensão de fenômenos físicos. E é a partir desse pensamento que este trabalho tem o objetivo de fazer uma analogia entre som e luz, trazendo ideias e experimentos relativamente simples e acessíveis, que mostram seus comportamentos de maneira clara e visual. Para tentar atingir este objetivo, apresentarei experimentos que mostram o comportamento ondulatório do som e da luz, através do fenômeno de interferência, e experimentos que mostram a interação de ondas com outros corpos, através da levitação acústica e da levitação óptica.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 CONTEXTO HISTÓRICO

Durante os séculos XVII e XVIII, havia diferentes concepções a respeito da natureza da luz. Dois dos principais nomes que defendiam teorias opostas acerca da luz eram Isaac Newton (1643-1727) e Christiaan Huygens (1629-1695). Newton defendia uma teoria corpuscular para a luz, enquanto Huygens defendia uma teoria ondulatória, mas devido à autoridade de Newton, sua teoria foi mais bem aceita pela comunidade científica da época. Contudo, no início do século XIX, fazendo uma analogia com o som (YOUNG, 1800), Thomas Young (1773-1829) conseguiu resgatar a teoria ondulatória da luz. Notoriamente, ele elaborou um experimento que ficou conhecido como a dupla fenda. Neste experimento, Young fez com que dois feixes de luz (em fase) interagissem entre si, formando um padrão de interferência característico de ondas.

Nos anos seguintes, Augustin Fresnel (1788-1827) e François Arago (1786-1853), juntamente com Young, ajudaram a estabelecer a teoria ondulatória da luz como novo paradigma. Mais adiante, ainda no século XIX, os trabalhos de James Clerk Maxwell (1831-1879) propuseram que a luz seria uma onda eletromagnética, o que foi corroborado por Heinrich Hertz (1857-1894), através de experimentos realizados entre 1886 e 1889.

2.2 ONDAS

Para a física, onda é o movimento causado por uma perturbação que se propaga pelo espaço e transmite energia sem transportar matéria.

Quanto à sua natureza as ondas podem ser:

- Mecânicas: que precisam de um meio material para se propagar.
- Eletromagnéticas: que não necessitam de um meio material para se propagar.

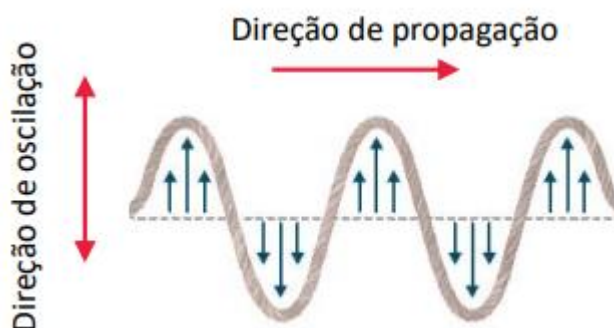
Quanto à direção de propagação as ondas podem ser:

- Unidimensionais: Que se propagam em apenas uma direção.
- Bidimensionais: Que se propagam em um plano.
- Tridimensionais: Que se propagam em todas as direções.

Quanto à direção de oscilação as ondas podem ser:

- Transversais: Quando as oscilações são perpendiculares à direção de propagação.

Figura 1 — Onda transversal em uma corda.



Fonte: Adaptado de Ondas... (2022, p.3).

- Longitudinais: Quando as oscilações coincidem com a direção de propagação.

Figura 2 — Onda longitudinal em uma mola.



Fonte: Adaptado de Ondas... (2022, p.4).

Uma única oscilação propagada pelo espaço é chamada de pulso de onda; uma sequência de pulsos periódicos forma uma onda periódica e o conjunto de pontos atingidos simultaneamente por um mesmo pulso de uma onda é chamado de frente de onda, podendo ter um formato plano, circular ou outro qualquer.

2.2.1 Propriedades das ondas

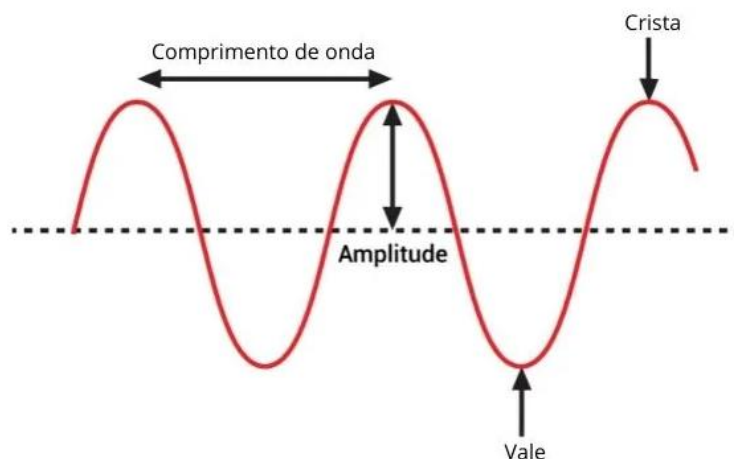
Para compreendermos melhor as ondas, precisamos também conhecer suas propriedades.

Independente de qual seja a natureza, direção de propagação e oscilação, as ondas apresentam as mesmas propriedades, que são:

- Comprimento de onda: representado pelo símbolo λ , é definido pela distância entre duas cristas ou dois vales consecutivos. No sistema internacional, o comprimento de onda é medido em metros (m).
- Frequência: representada pela letra f , é o número de oscilações que uma onda realiza em um determinado período de tempo. No sistema internacional, a frequência é medida em hertz (Hz), que é o número de oscilações por segundo.
- Período: representado pela letra T , é o tempo necessário que uma onda leva para realizar uma oscilação completa. No sistema internacional, o período é medido em segundos (s).
- Velocidade de propagação: representada pela letra v , a velocidade de propagação de uma onda depende do tipo de onda e do meio em que ela se propaga. No sistema internacional, a velocidade de propagação é dada em metros por segundo (m/s).

- Amplitude: representada pela letra A , é a distância da posição de equilíbrio até a crista ou vale e representa a intensidade da onda. No sistema internacional, a amplitude é medida em metros.

Figura 3 — Representação gráfica de uma onda.



Fonte: (OLIVEIRA, 2022).

Existe uma relação entre a frequência e o período, dada por

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Como a velocidade de uma onda que se propaga em um determinado meio é constante, substituindo s por λ e t por T , podemos utilizar a equação horária do movimento uniforme (MU) e fazer a seguinte equivalência:

$$s = v \cdot t \rightarrow \lambda = v \cdot T \rightarrow \lambda = v \cdot \frac{1}{f}$$

Onde s é o espaço percorrido, v é a velocidade e t é o tempo.

Logo, chegamos na chamada equação fundamental da ondulatória

$$v = \lambda \cdot f \quad (2)$$

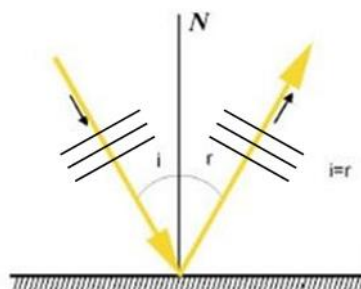
2.3 FENÔMENOS ONDULATÓRIOS

Os fenômenos ondulatórios ocorrem quando as ondas mudam o meio em que se propagam, incidem sobre superfícies e objetos ou se propagam no mesmo ponto do espaço junto com uma ou mais ondas. Todas as ondas, independente de sua natureza e de suas propriedades, estão sujeitas a estes fenômenos.

2.3.1 Reflexão

A reflexão ocorre quando a onda incide sobre uma superfície ou objeto e retorna para o mesmo meio no qual já se propagava. Após a reflexão, a velocidade, frequência e o comprimento de onda não são alterados. Em relação a uma reta normal à superfície, posicionado no ponto em que a onda incide, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

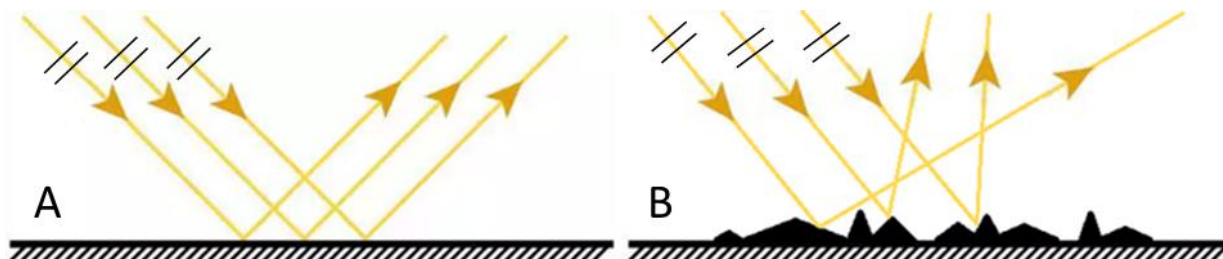
Figura 4 — Onda refletida.



Fonte: Adaptado de Lira (2022).

Chamamos de reflexão regular, ou especular, a reflexão em que a onda incide sobre uma superfície lisa e não sofre distorção. E chamamos de reflexão difusa a reflexão em que a onda incide sobre uma superfície irregular e sofre distorção.

Figura 5 — Reflexão regular (A) / Reflexão difusa (B).

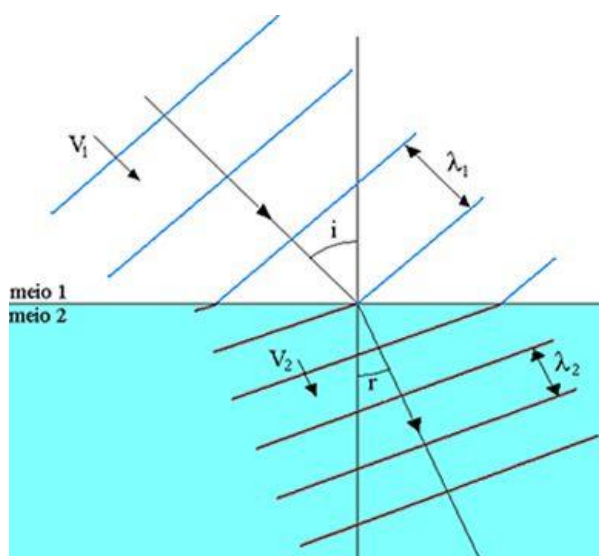


Fonte: Adaptado de Helerbrock (2022).

2.3.2 Refração

A refração ocorre quando a onda muda o meio em que se propaga. Como cada meio de propagação possui características distintas, essa mudança faz com que propriedades da onda como velocidade e comprimento de onda sejam alteradas, além da possibilidade de alteração na direção de propagação. Já a frequência, por depender apenas da fonte que emite a onda, permanece inalterada.

Figura 6 — Onda refratada.

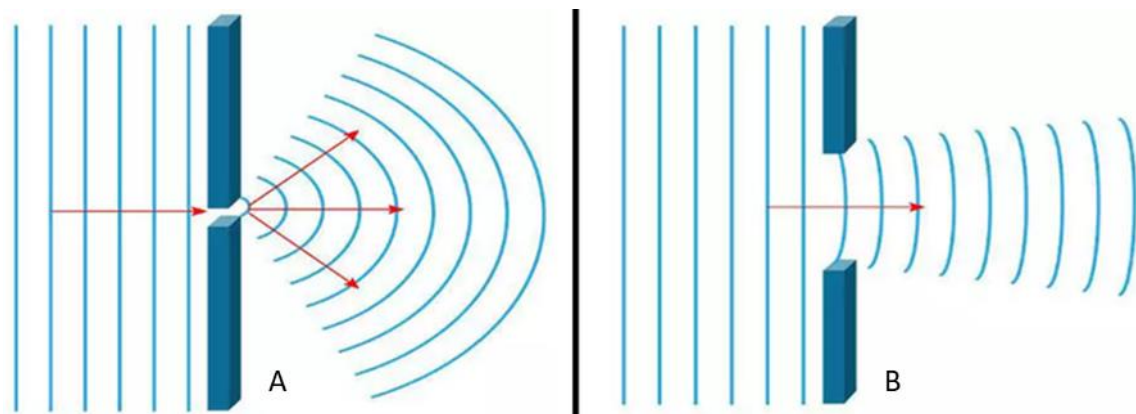


Fonte: (SILVA, 2022).

2.3.3 Difração

A difração é a capacidade que a onda possui de contornar obstáculos. Quando uma onda atravessa uma fenda ou um orifício, ela se espalha e consegue se propagar em mais direções. Quanto mais próximo do comprimento de onda for a dimensão do obstáculo ou da fenda, mais perceptível será a capacidade que a onda terá de contornar e se espalhar. Após a difração, o módulo da velocidade, comprimento de onda e frequência da onda não se alteram.

Figura 7 — Difração por fenda com dimensão próxima ao comprimento de onda (A) / Difração por fenda com dimensão desproporcional ao comprimento de onda (B).

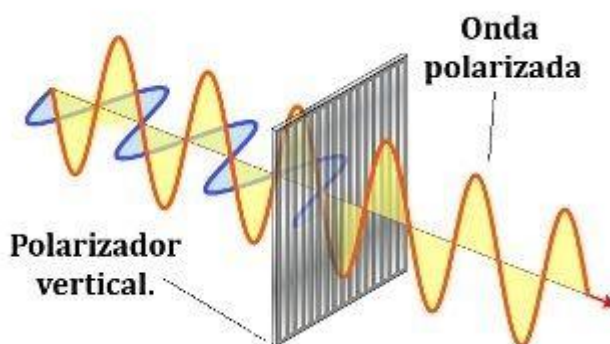


Fonte: Adaptado de Júnior (2022).

2.3.4 Polarização

A polarização ocorre apenas com ondas transversais (que possuem a direção de oscilação perpendicular à direção de propagação). A polarização identifica o comportamento da direção de oscilação da onda. Por exemplo, uma polarização vertical significa que a onda oscila na direção vertical. As ondas podem ser polarizadas também na horizontal ou em qualquer outra direção, ou mesmo circularmente polarizada, em que a direção de oscilação vai girando e mudando de direção à medida que a onda se propaga. Diferentes processos e materiais podem polarizar parcial ou completamente uma onda inicialmente não polarizada, como por exemplo, a passagem por determinados materiais com propriedades ópticas específicas (filtros polarizadores, por exemplo), ou mesmo a reflexão da luz.

Figura 8 — Onda polarizada.



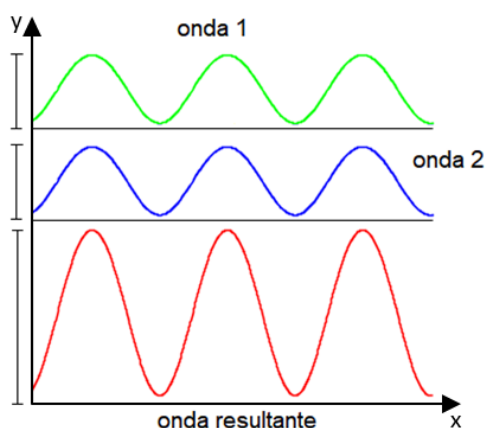
Fonte: Adaptado de Júnior (2022).

2.3.5 Interferência

Interferência é o fenômeno ocasionado pela superposição de ondas, que é a soma algébrica das amplitudes de duas ou mais ondas que se cruzam em um mesmo ponto do meio em que se propagam. Segundo o princípio da independência das ondas, após a superposição cada onda continua a se propagar na mesma direção e sentido e, com as mesmas características que possuíam antes da interferência.

À interferência que se origina do encontro de cristas ou do encontro de vales, chamamos de interferência construtiva.

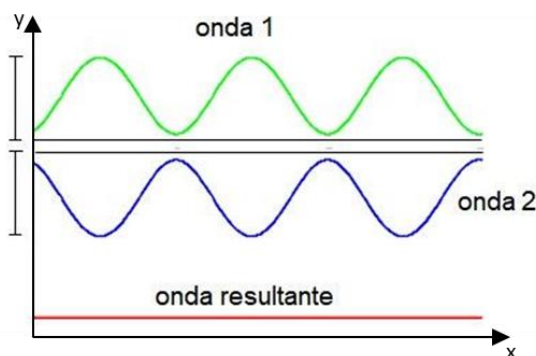
Figura 9 — Interferência construtiva entre duas ondas.



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2022).

Já a interferência que se origina do encontro de cristas com vales, chamamos de interferência destrutiva.

Figura 10 — Interferência destrutiva total entre duas ondas.



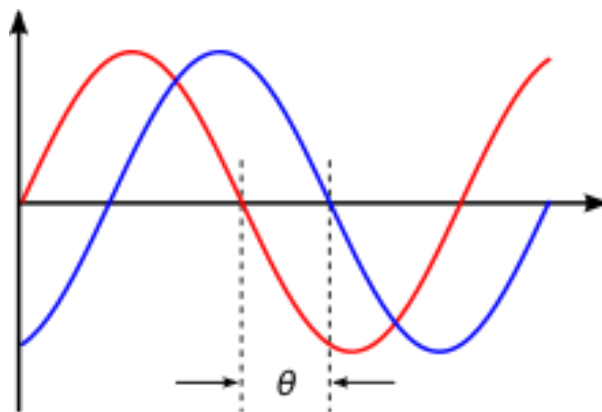
Fonte: Adaptado de Rodrigues (2022).

Os exemplos mostrados acima representam uma interferência construtiva total, que é quando a onda resultante atinge a amplitude máxima, de acordo com o princípio da superposição de onda e, uma interferência destrutiva total, que é quando a onda resultante deixa de oscilar nos pontos onde ocorre este tipo de interferência, respectivamente. Aos demais casos, podemos chamar de interferência construtiva/destrutiva parcial.

Quando duas ondas não coincidem suas cristas e seus vales, dizemos que estas ondas apresentam uma diferença de fase, representada pela letra grega ϕ . Uma oscilação completa de uma onda é equivalente a um ângulo de 2π radianos, que também equivale a um comprimento de onda (λ).

Quando temos uma diferença de fase de 2π radianos ou um comprimento de onda, temos uma interferência construtiva total e, quando temos uma diferença de fase de π radianos ou meio comprimento de onda, temos uma interferência destrutiva total (considerando ondas com a mesma velocidade, amplitude e frequência). E nas demais situações temos interferências construtivas/destrutivas parciais.

Figura 11 — Diferença de fase representada pelo ângulo θ .

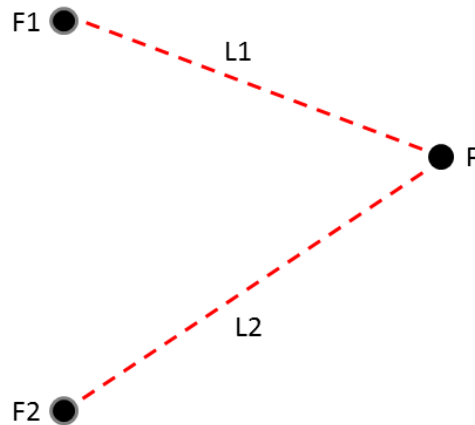


Fonte: (FASE..., 2022).

Esta diferença de fase pode ser ocasionada pelas fontes que emitem as ondas ou pela diferença de caminhos percorridos pelas ondas, ao se encontrarem em um determinado ponto do meio em que se propagam. Esta diferença de caminho percorrido pode ser descrita em termos do comprimento de onda e determina se a interferência será construtiva ou destrutiva.

Vejamos a seguinte situação em que duas fontes $F1$ e $F2$ emitem ondas com as mesmas propriedades, que irão se encontrar em um ponto P , percorrendo caminhos distintos $L1$ e $L2$ (figura 12):

Figura 12 — Interferência por diferença de caminho.



Fonte: O autor (2022).

Para que haja uma interferência construtiva, a diferença entre os caminhos percorridos $L1$ e $L2$, deve ser nula ou um múltiplo de um comprimento de onda.

$$\Delta L = |L2 - L1|$$

$$\Delta L = n\lambda$$

$$(n = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

Para que haja uma interferência destrutiva, a diferença entre os caminhos percorridos $L1$ e $L2$, deve ser um número ímpar de metade de um comprimento de onda.

$$\Delta L = |L2 - L1|$$

$$\Delta L = n\left(\frac{\lambda}{2}\right)$$

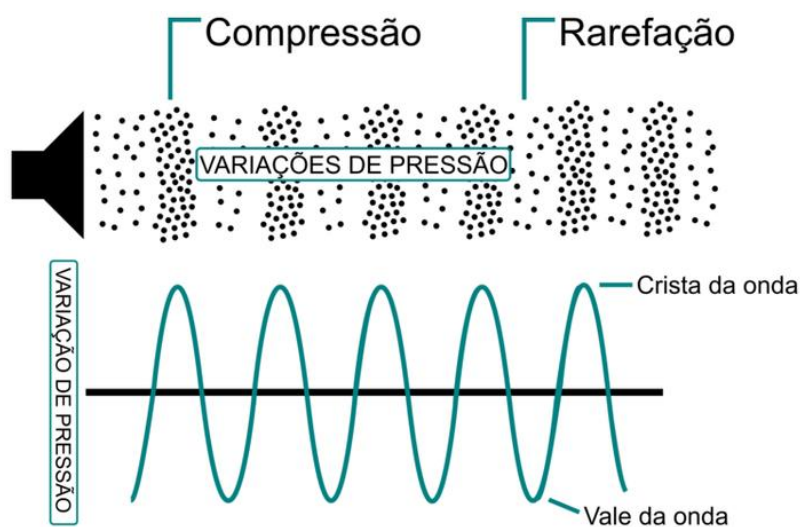
$$(n = 1, 3, 5, \dots)$$

2.4 O SOM COMO UMA ONDA

2.4.1 Ondas sonoras

Ondas sonoras são ondas mecânicas, longitudinais (quando se propagam em fluidos) e tridimensionais, causadas pela compressão e rarefação do meio em que se propagam, criando zonas de alta e baixa pressão.

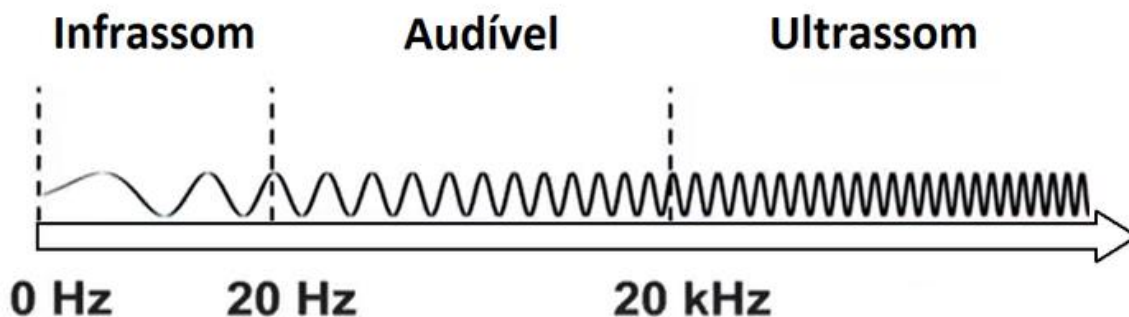
Figura 13 — Representação de uma onda sonora.



Fonte: Adaptado de Som (2022).

De acordo com sua frequência, as ondas sonoras podem ser classificadas como infrassom, som audível e ultrassom.

Figura 14 — Classificação sonora.



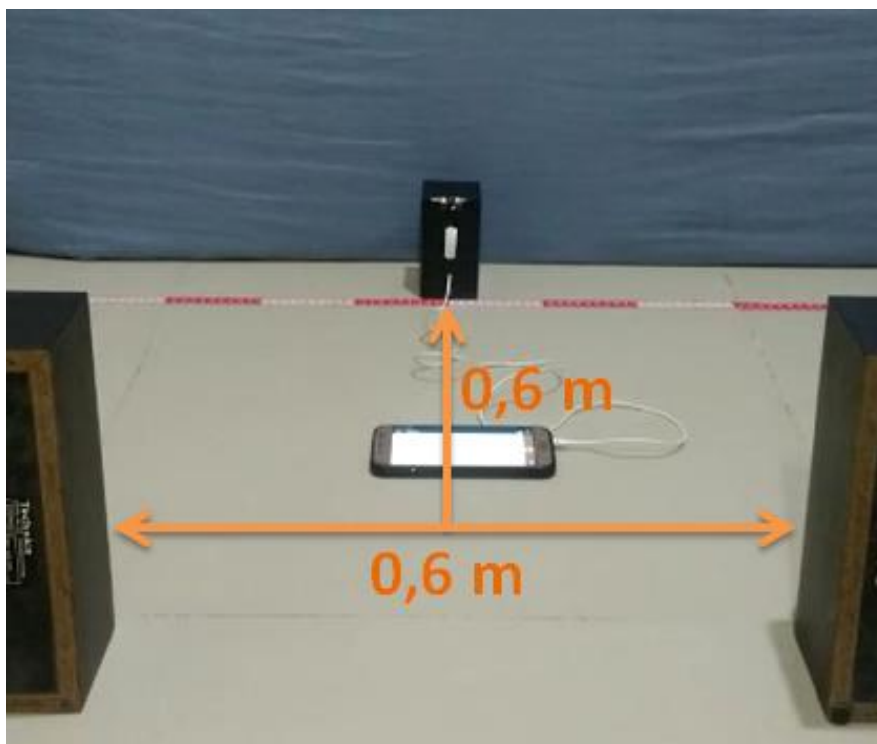
Fonte: Adaptado de Andrade (2018).

2.4.2 Experimento 1: Interferência sonora (dupla fenda acústica)

Eu realizei este experimento com o objetivo de mostrar o comportamento ondulatório do som através do fenômeno da interferência. Para isso eu montei o seguinte esquema:

Duas fontes sonoras, que emitiam ondas com frequência de 5 kHz, foram posicionadas a 0,6 m de distância uma da outra. Em frente às fontes, também a 0,6 metro da linha em que se encontravam as mesmas, um receptor (microfone) também foi posicionado. Este receptor estava conectado a um aparelho celular e, à sua frente, havia uma fita métrica para poder medir a sua posição horizontal (figura 15).

Figura 15 — Montagem do experimento.



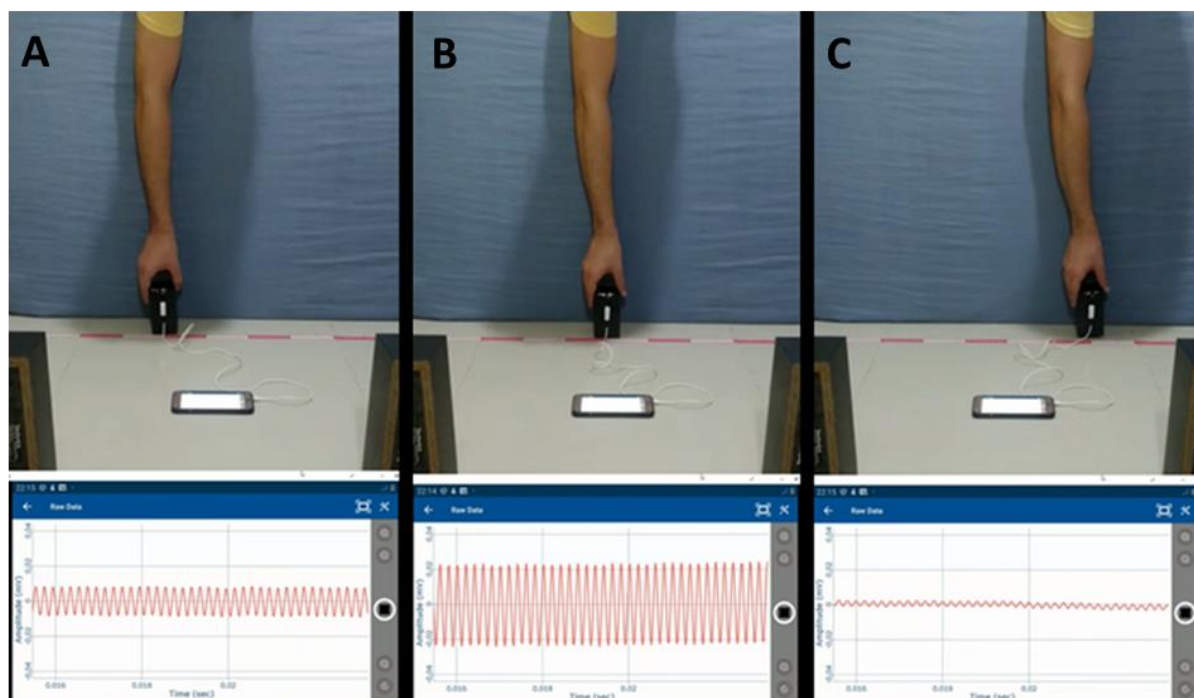
Fonte: O autor (2022).

Inicialmente posicionado em um ponto central entre as fontes, o receptor captava as ondas emitidas por elas e o aparelho celular, por meio de um aplicativo¹, conseguia medir a intensidade sonora no ponto em que se encontrava o receptor.

¹ Aplicativo iNVH (BOSCH).

Na primeira parte deste experimento, eu variei a posição horizontal do receptor enquanto a intensidade sonora era medida em cada ponto em que o receptor se encontrava. E o resultado foi que, ao variar a posição do receptor, conforme já mencionado, a intensidade sonora também variava, alternando entre máximos e mínimos de intensidade, tendo um ponto máximo bem ao centro, onde o receptor foi inicialmente posicionado (figura 16).

Figura 16 — Imagens da realização do experimento onde é possível ver o registro da intensidade sonora em um ponto qualquer (A), no máximo central (B) e num mínimo de interferência (C).

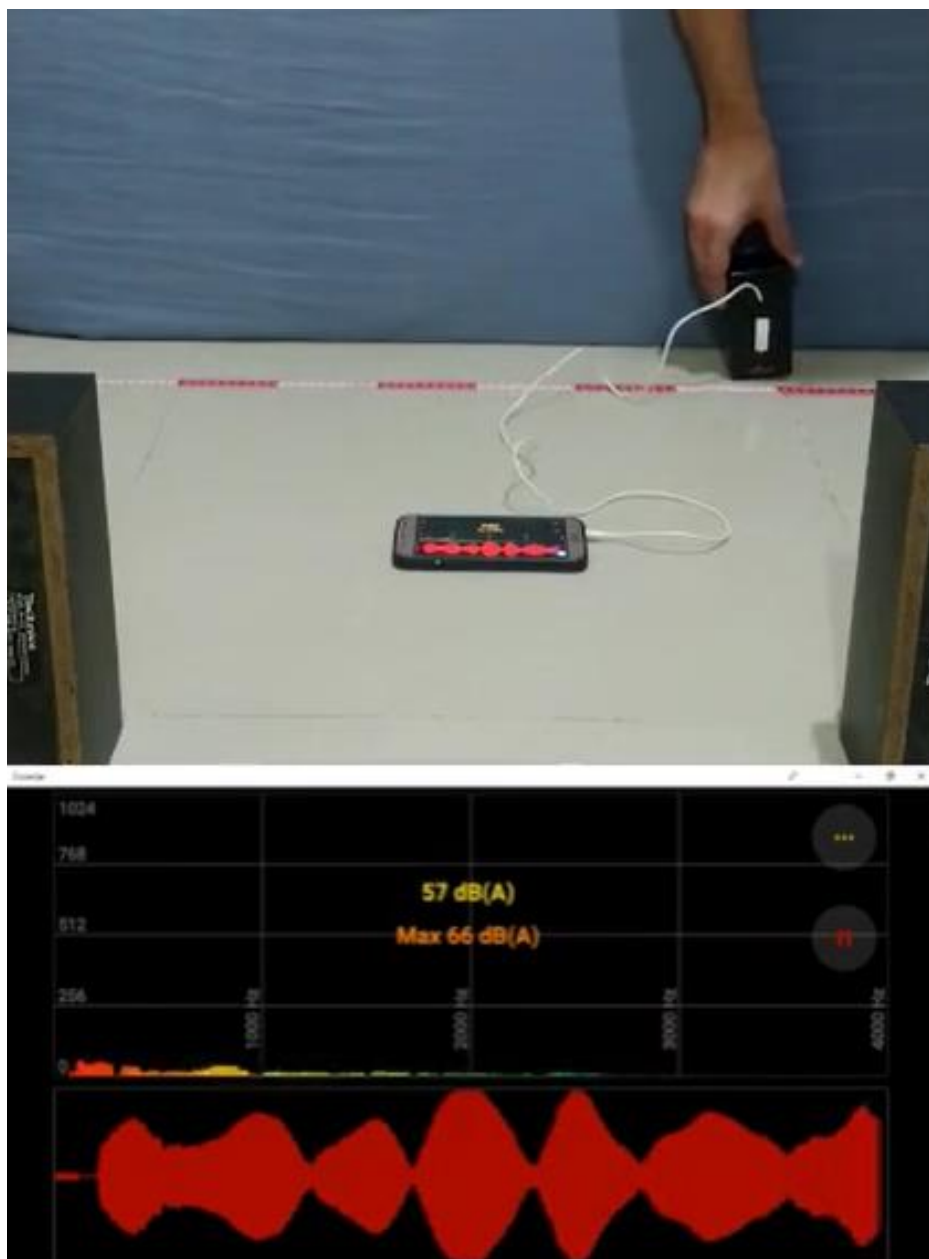


Fonte: O autor (2022).

Na segunda parte do experimento o processo foi semelhante, mas desta vez o receptor foi posicionado em frente a uma das fontes e levado até a frente da outra, para que, por meio de um outro aplicativo², fossem registrados graficamente agora os níveis de intensidade sonora em função do espaço. Mais uma vez pudemos registrar diferentes níveis de intensidade sonora em diferentes pontos do espaço (figura 17).

² Aplicativo mr spectra.

Figura 17 — Imagem da realização do experimento onde é possível ver o registro dos níveis de intensidade sonora em função do espaço.

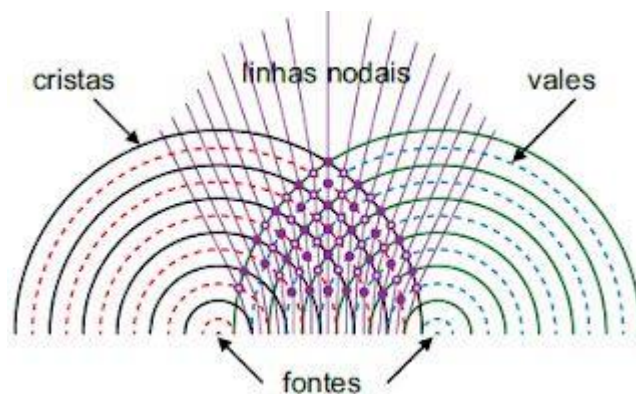


Fonte: O autor (2022).

Como resultado geral, o experimento conseguiu registrar um padrão de interferência ocasionado pela interação das ondas emitidas pelas fontes, conforme já era previsto pela teoria ondulatória. E com isso podemos constatar de maneira experimental que o som possui um comportamento ondulatório e se propaga como uma onda sonora.

Para exemplificar como este padrão de interferência foi formado, vamos supor que duas fontes $F1$ e $F2$ emitem simultaneamente ondas com as mesmas propriedades e com frentes de onda circular (situação que se assemelha ao esquema do experimento) (figura 18).

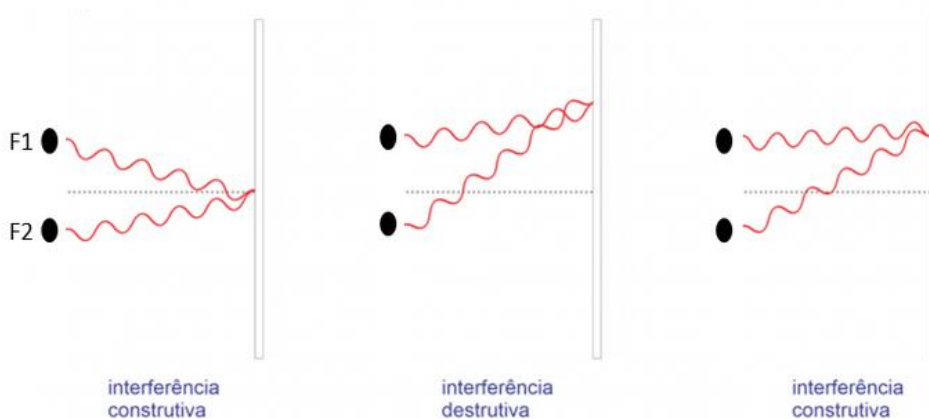
Figura 18 — Interferência bidimensional.



Fonte: (WAGNER, 2012).

Quando ocorre o encontro entre duas cristas ou dois vales (marcados pelos círculos roxos cheios), haverá uma interferência construtiva. E quando ocorre o encontro de uma crista com um vale (marcados pelos círculos roxos vazados), haverá uma interferência destrutiva. E o que determina se vai haver uma interferência construtiva ou destrutiva é a diferença entre o caminho percorrido por cada uma das ondas (figura 19).

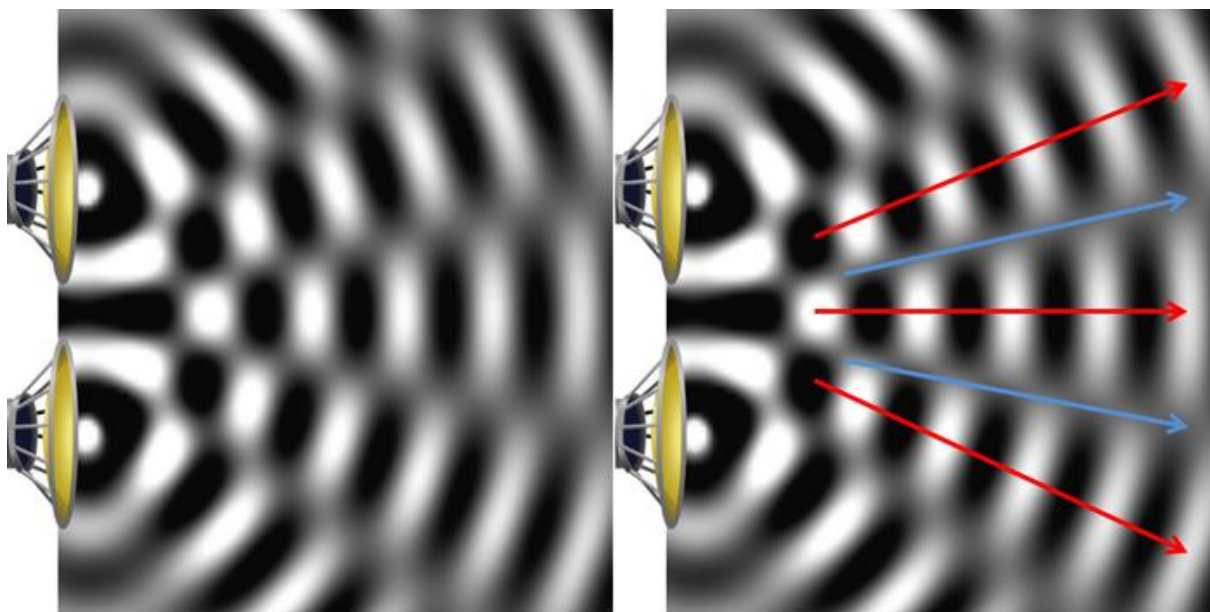
Figura 19 — Interferência por diferença de caminho.



Fonte: Adaptado de UFMG (2022).

A seguir, podemos ver a formação de um padrão de interferência de duas ondas sonoras (figura 20). As linhas brancas representam as cristas e as linhas pretas representam os vales. As setas vermelhas indicam a ocorrência de interferência construtiva e as setas azuis indicam a ocorrência de interferência destrutiva total.

Figura 20 — Interferência sonora.

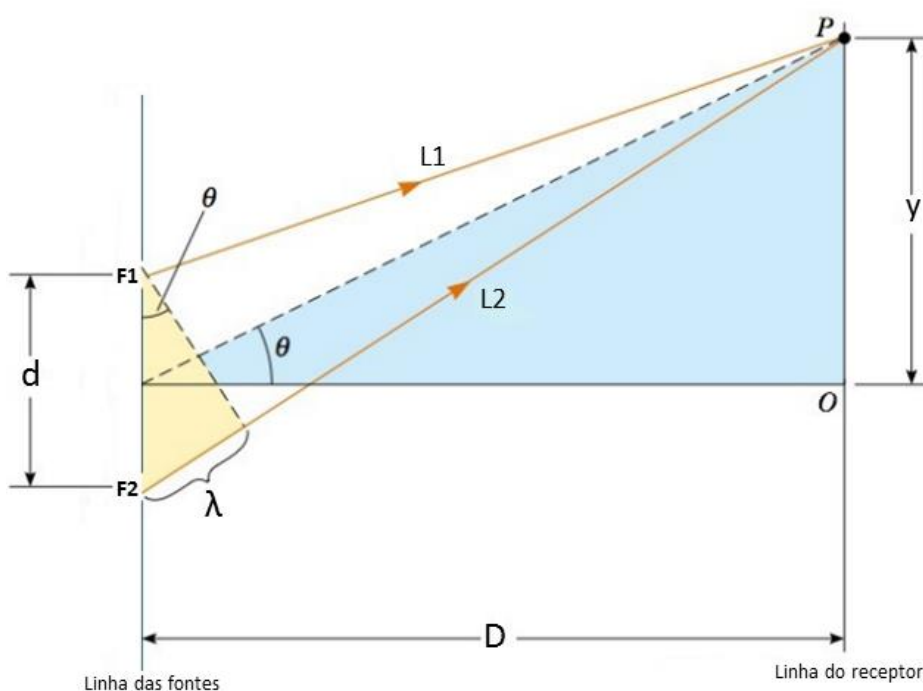


Fonte: Adaptado de Phet (2022).

De maneira genérica, vamos supor que as fontes $F1$ e $F2$, que estão separadas por uma distância d , emitem ondas com as mesmas propriedades que vão se encontrar no ponto P , que representa o primeiro máximo de intensidade sonora após o máximo central O , sendo y a distância entre P e O (figura 21). Estas ondas irão percorrer caminhos distintos $L1$ e $L2$. Se traçarmos uma reta a partir da fonte $F1$ até a linha do caminho $L2$, de modo que esta reta seja perpendicular à linha de $L2$, conseguimos obter a diferença entre os caminhos percorridos $|L2-L1|$ por cada onda, que será a distância da fonte $F2$ até a reta perpendicular à $L2$. Por se tratar do primeiro máximo de intensidade após o máximo central, podemos concluir que esta distância equivale a um comprimento de onda λ e que esta distância λ , junto com a distância entre as fontes d e a reta perpendicular à $L2$, formam um triângulo retângulo, marcado pela cor amarela.

Então, se traçarmos uma reta do ponto médio entre as fontes até o ponto O , que vale D , uma outra do ponto O até o ponto P , que vale y , e outra do ponto P até o ponto médio entre as fontes, teremos um segundo triângulo retângulo, marcado pela cor azul, que é semelhante ao triângulo amarelo, ambos com o mesmo ângulo θ .

Figura 21 — Geometria da interferência.



Fonte: Adaptado de USP (2022, p.46).

No caso do experimento realizado, sabemos que a velocidade de propagação da onda sonora no ar é de 340 metros por segundo (m/s), que a frequência da onda emitida é de 5,000 kHz e que através da equação fundamental da ondulatória, podemos achar o valor de λ^3 .

$$v = \lambda \cdot f$$

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

$$\lambda = \frac{340}{5000}$$

$$\lambda = (0,068 \pm 0,002) \text{ m}$$

³ Levando em conta a incerteza da propagação da onda sonora no ar, que depende da temperatura, e a incerteza da frequência emitida pelo celular, temos uma incerteza na casa de milímetros para o comprimento de onda.

Agora sabendo o valor de λ e que d equivale a 0,60 m, podemos calcular o quanto vale o ângulo θ .

$$\begin{aligned}\text{seno}(\theta) &= \frac{\lambda}{d} \\ \text{seno}(\theta) &= \frac{0,068}{0,60} \\ \text{seno}(\theta) &= 0,11\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\theta &= \text{arco seno}(0,11) \\ \theta &\cong 6,3^\circ\end{aligned}$$

Para ângulos desta dimensão, podemos dizer que o seno de θ é igual à tangente de θ e com isso formular uma equação para determinar a distância do máximo central até o primeiro máximo.

$$\begin{aligned}\text{seno}(\theta) &= \frac{\lambda}{d} \\ \text{tang}(\theta) &= \frac{y}{D} \\ \frac{\lambda}{d} &= \frac{y}{D}\end{aligned}$$

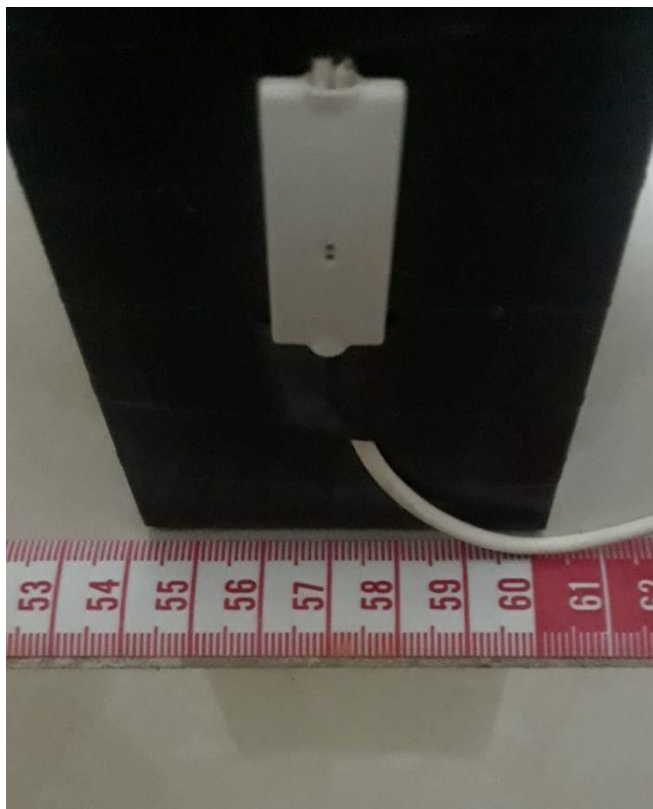
Logo,

$$y = \frac{\lambda \cdot D}{d} \quad (3)$$

E para finalizar este experimento, eu utilizei esta equação para calcular a distância do máximo central até o primeiro máximo, de acordo com a teoria ondulatória e comparei com a medição feita por mim (figura 22).

$$y = \frac{\lambda \cdot D}{d}$$
$$y = \frac{0,068 \cdot 0,60}{0,60}$$
$$y = 0,068 \text{ m}$$

Figura 22 — Distância entre máximos de intensidade (com o máximo central sobre a marca de 0,5 m).



Fonte: O autor (2022).

Logo podemos ver que a medida achada por mim, de aproximadamente 0,07 m, é compatível com a medida esperada pela teoria ondulatória, que era de 0,068 m, obtendo um erro de aproximadamente 3% e chegando em um resultado satisfatório.

2.5 A LUZ COMO UMA ONDA

2.5.1 Experimento 2: Interferência luminosa (dupla fenda óptica)

De maneira análoga ao anterior, eu realizei este experimento com objetivo de tentar mostrar o comportamento ondulatório da luz, também através do fenômeno da interferência, utilizando métodos semelhantes e fazendo comparações com os padrões formados. E para isso eu utilizei um laser que emite luz com comprimento de onda de aproximadamente 532 nanômetros (nm), correspondente à cor verde.

Na ponta deste laser, eu coloquei um pedaço de papel alumínio, com duas fendas feitas com um estilete, com uma distância de aproximadamente 10^{-3} metro entre elas. Essas fendas foram posicionadas, de modo que o feixe de luz do laser pudesse passar por ambas simultaneamente (figura 23).

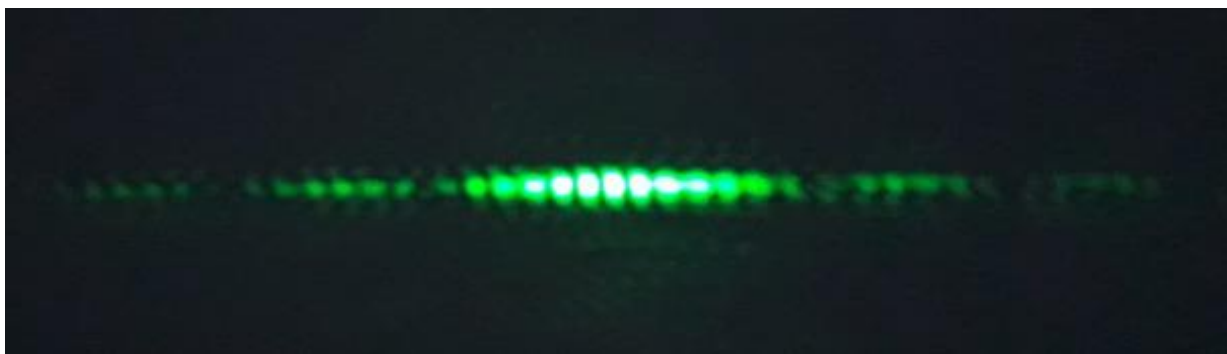
Figura 23 — Fendas por onde passará o feixe de luz.



Fonte: O autor (2022).

Então, eu posicionei o aparato (laser e fendas) a uma distância de aproximadamente 4,8 metros de um anteparo (que neste caso é uma parede branca) e ao projetar o feixe de luz sobre o anteparo, em um ambiente escuro, é possível ver que, ao invés de formar uma imagem com o formato das duas fendas, é formado um padrão de interferência, intercalando máximos e mínimos de intensidade luminosa (franjas claras e escuras), com o máximo mais intenso bem no centro da projeção (figura 24).

Figura 24 — Padrão de interferência (Dupla fenda óptica).

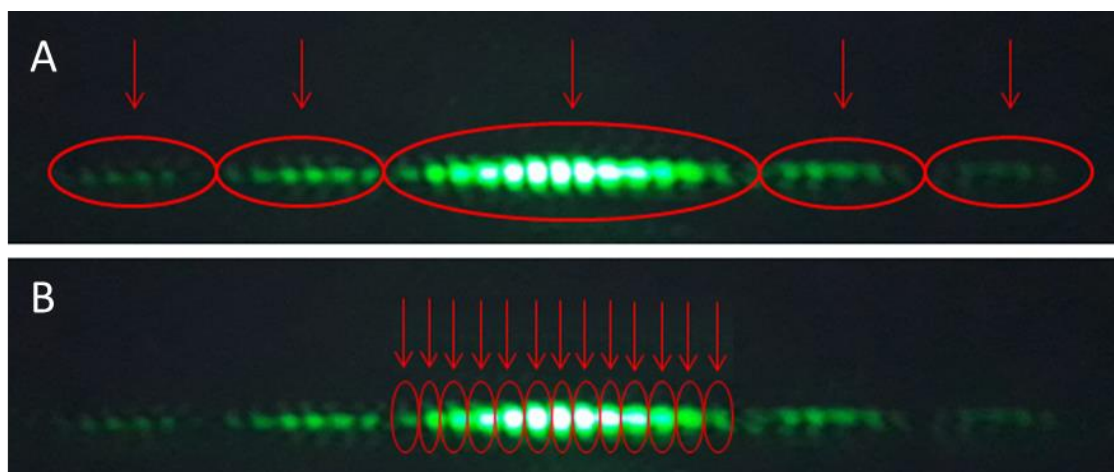


Fonte: O autor (2022).

Este padrão de interferência nos permite concluir que a luz também assume um comportamento de natureza ondulatória, sendo classificada como uma onda eletromagnética.

Vale ressaltar que esta imagem (figura 24) apresenta uma sobreposição da interferência causada pelas duas fendas com a difração causada por cada fenda. Assim, entre os mínimos de difração (figura 25A) aparecem máximos e mínimos de interferência (figura 25B).

Figura 25 — Padrão formado pela difração de cada fenda (A) / Padrão formado pela interferência das duas fendas (B).

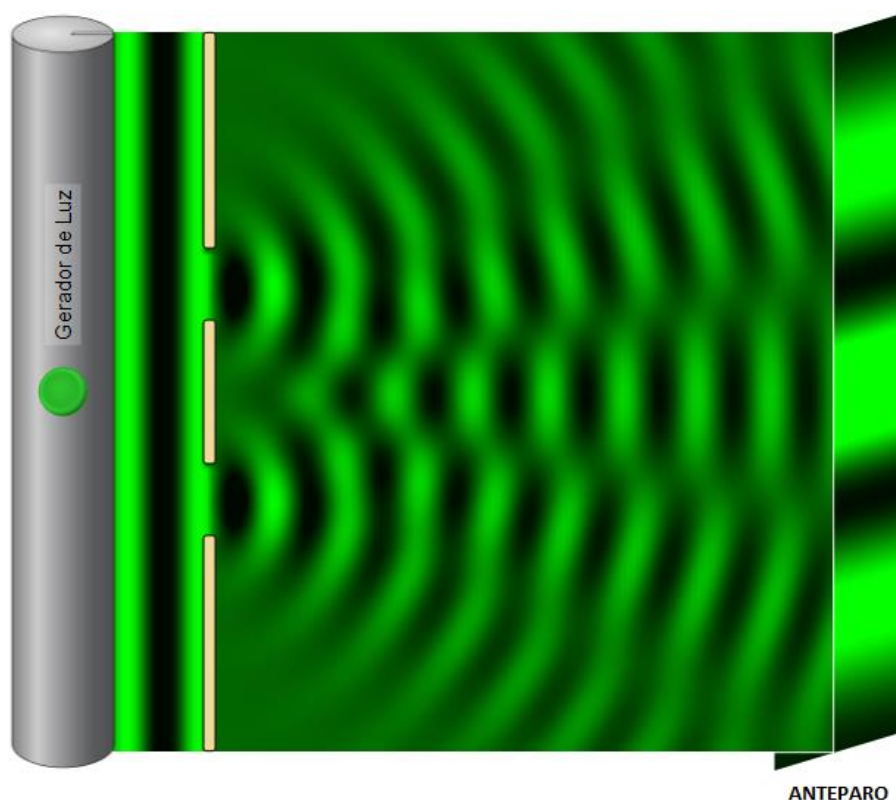


Fonte: O autor (2022).

Mas para este trabalho, vamos tratar apenas da interferência causada pelas fendas, e não da difração.

A formação deste padrão de interferência ocorre da mesma maneira que o padrão de interferência acústico, mas no caso deste experimento, quando o feixe de luz do laser (fonte luminosa) passa pelas fendas, este feixe é difratado em cada uma das fendas que passam a ser fontes secundárias (figura 26).

Figura 26 — Interferência luminosa.



Fonte: Adaptado de Phet (2022).

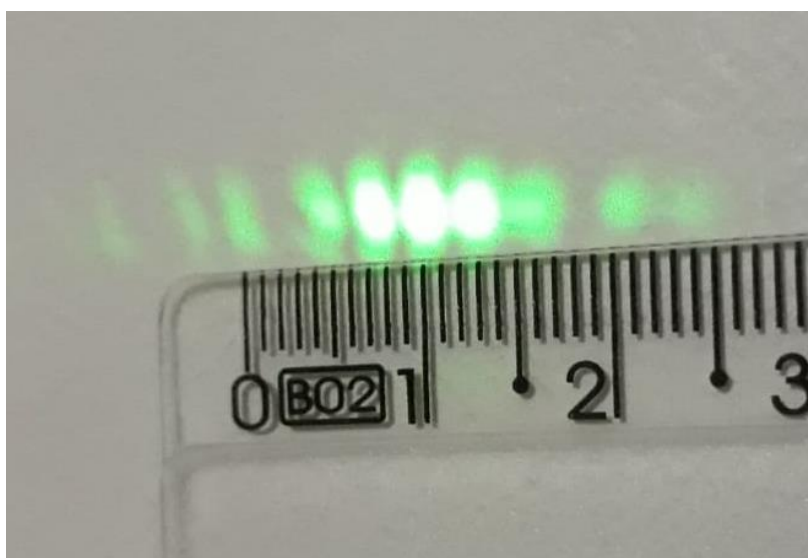
Para calcular a distância do máximo central até o primeiro máximo, eu utilizei o mesmo método do experimento anterior, aplicando a equação 3, e depois comparei com a medição feita por mim. E como neste caso a distância das fendas até o anteparo é muito maior que a distância entre as fendas, podemos considerar que o seno do ângulo θ é igual à tangente do ângulo θ , sem a necessidade de calcular θ .

$$y = \frac{\lambda \cdot D}{d}$$

$$y = \frac{532 \times 10^{-9} \cdot 4,8}{1,0 \times 10^{-3}}$$

$$y = 0,0026 \text{ m}$$

Figura 27 — Distância entre máximos.



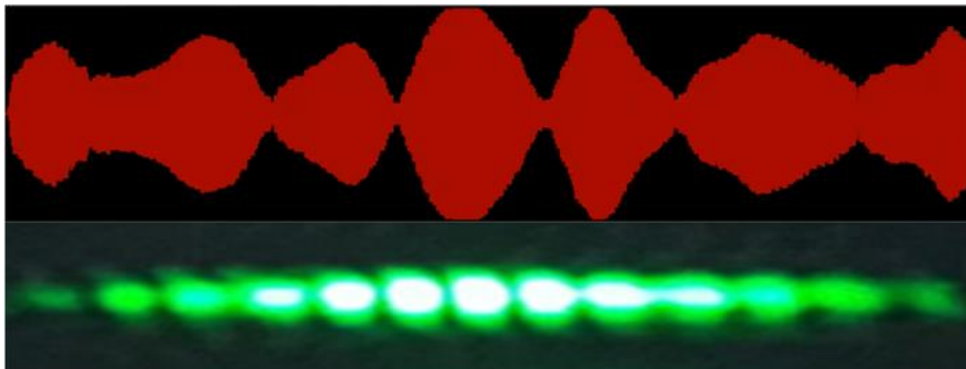
Fonte: O autor (2022).

Nesta imagem (figura 27) podemos ver que a distância entre o máximo central e o primeiro máximo, está entre 0,003 m e 0,0025 m. Para minimizar esta incerteza, eu fiz a medição da segunda franja escura à esquerda até a segunda franja escura à direita⁴, que é aproximadamente 0,008 m e dividi por 3, encontrando um valor de 0,0027 m. Este valor está próximo do valor esperado pela teoria, que era de 0,0026 m, obtendo um erro de aproximadamente 4%.

⁴ Quando medimos n franjas e dividimos o valor medido por n , obtemos um valor para a largura da franja com uma incerteza reduzida pelo mesmo fator n .

Para finalizar este experimento, eu fiz uma comparação visual entre o padrão de interferência formado pelo som e o padrão de interferência formado pela luz (figura 28).

Figura 28 — Comparação entre padrões de interferência sonora (em cima) e luminosa (embaixo).

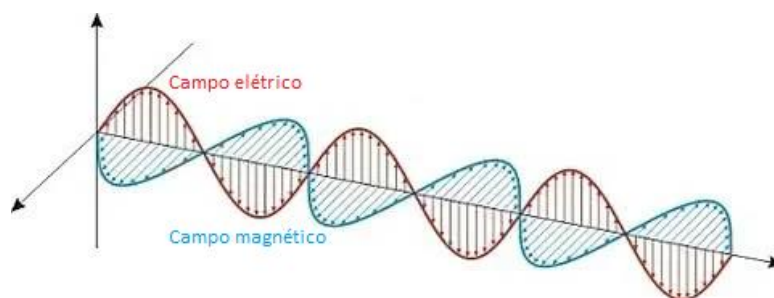


Fonte: O autor (2022).

2.5.2 Ondas eletromagnéticas

Ondas eletromagnéticas são ondas transversais e tridimensionais, formadas por campos elétricos e magnéticos variáveis e perpendiculares entre si. De acordo com as equações de Maxwell, um campo elétrico variável gera um campo magnético variável e vice versa.

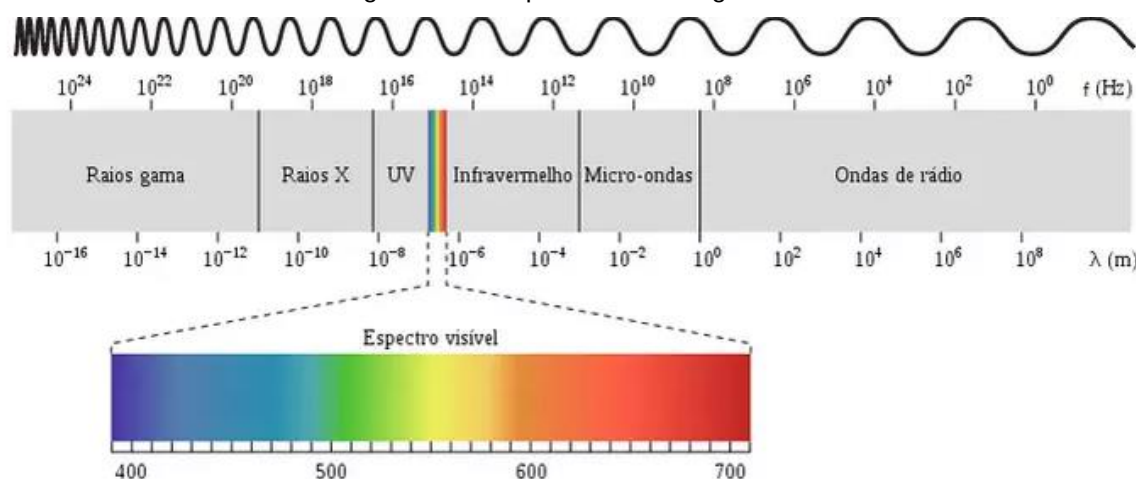
Figura 29 — Onda eletromagnética.



Fonte: Adaptado de Helerbrock (2022).

De acordo com sua frequência e seu comprimento de onda, as ondas eletromagnéticas podem ser classificadas como ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz (espectro) visível, ultravioleta, raios-X e raios gama.

Figura 30 — Espectro eletromagnético.



Fonte: Adaptado de Tungsten (2017).

Apesar da luz ser uma onda eletromagnética tridimensional, os lasers conseguem emití-la em uma única direção, devido a geometria de sua cavidade ressonante.

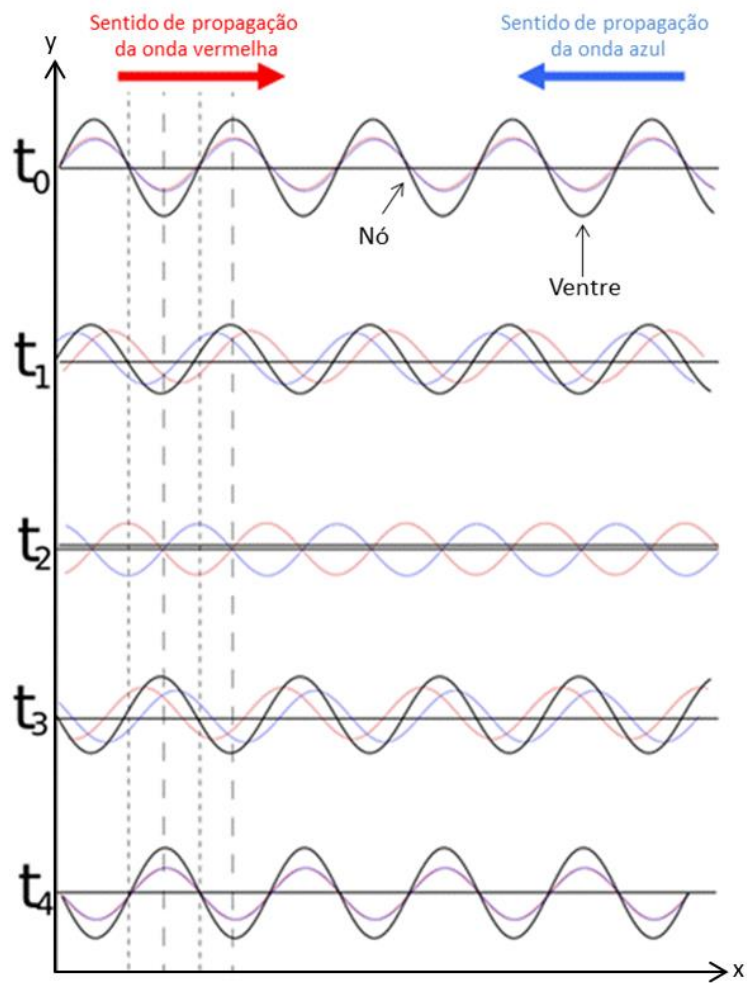
2.6 ONDAS ESTACIONÁRIAS

Ondas estacionárias são ondas que resultam da superposição de duas ondas com mesma frequência, amplitude e comprimento de onda, que se propagam na mesma direção, porém, em sentidos opostos. Em uma onda estacionária, existem pontos onde sempre haverá uma interferência destrutiva, que são chamados de nós. Nesses pontos não ocorrem oscilações e a amplitude é nula. Entre os nós existem regiões onde haverá interferências construtivas e destrutivas, alternadamente, que são chamados de ventres⁵. Nessas regiões ocorrem oscilações em que a amplitude varia de nula a máxima.

Essas ondas são chamadas de estacionárias, pois os pontos onde ocorrem os nós e os ventres são fixos no espaço em função do tempo.

⁵ Nos anti-nós (pontos centrais dos ventres) a interferência será sempre construtiva.

Figura 31 — Onda estacionária com nós e ventres sobre pontos fixos em instantes diferentes.



Fonte: Adaptado de Onda... (2022).

2.6.1 Tubos sonoros

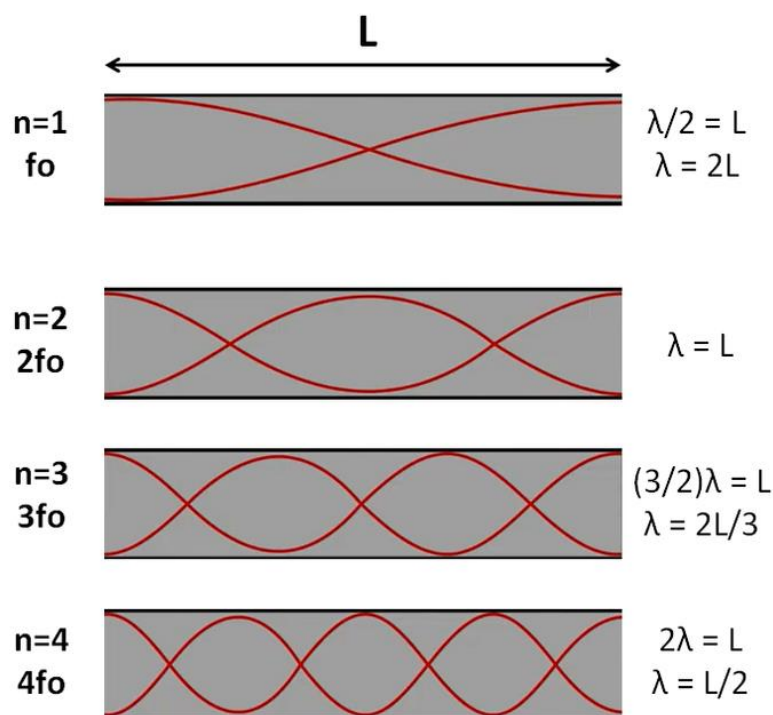
São tubos onde ocorre a formação de ondas sonoras estacionárias. Esses tubos podem ser abertos ou fechados.

2.6.1.1 Tubos abertos

São tubos que possuem as duas extremidades abertas, que são pontos onde ocorrerá a formação de ventres da onda estacionária.

Em um tubo de comprimento L , ondas estacionárias com diferentes números de nós e ventres podem ser formadas, e essa formação está diretamente relacionada com a frequência. Dizemos que a onda estacionária formada por um ventre está no primeiro harmônico ou harmônico fundamental, e as demais com 2, 3, 4, ... ventres, estão no segundo, terceiro, quarto, ... harmônico, simbolizados pela letra n .

Figura 32 — Tubos sonoros abertos.



Fonte: Adaptado de Irigoyen (2020).

Sabendo que para $n=1$, $\lambda=2L$, para $n=2$, $\lambda=L$ ou $\lambda=2L/2$, para $n=3$, $\lambda=2L/3$, ..., de maneira genérica podemos dizer que

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}$$

A partir da equação fundamental da ondulatória, podemos dizer que

$$v = \lambda \cdot f$$

$$v = \frac{2L}{n} \cdot f$$

Logo,

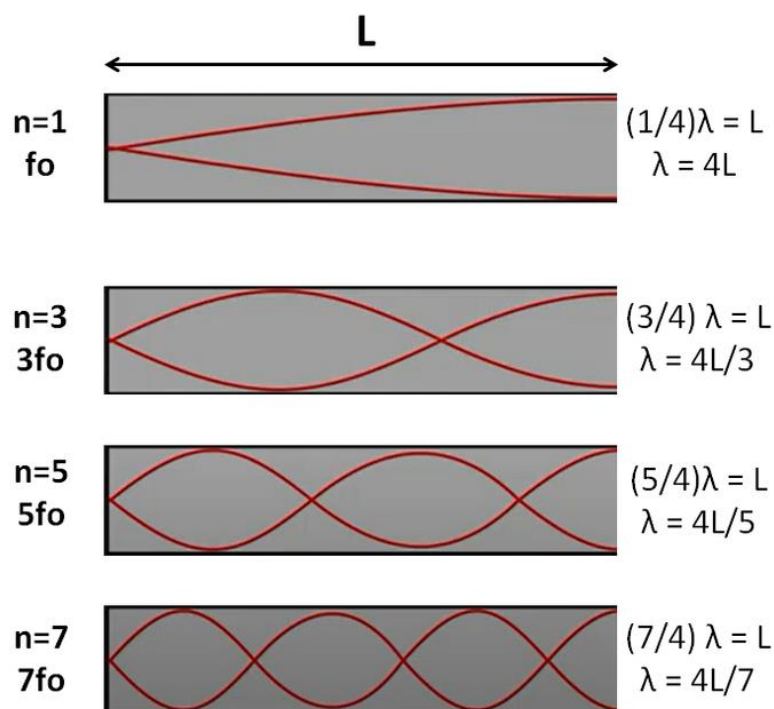
$$f_n = n \cdot \frac{v}{2L} \quad (4)$$

2.6.1.2 Tubos fechados

São tubos que possuem uma das extremidades aberta, que é um ponto onde ocorrerá a formação de um ventre da onda estacionária e, uma extremidade fechada, que é um ponto ocorrerá a formação de um nó da onda estacionária.

Em um tubo de comprimento L , ondas estacionárias com diferentes números de nós e ventres podem ser formadas, e essa formação está diretamente relacionada com a frequência. Dizemos que a onda estacionária formada por meio ventre está no primeiro harmônico ou harmônico fundamental e, as demais com 3, 5, 7, ... meios ventres, estão no terceiro, quinto, sétimo, ... harmônico, simbolizados pela letra n .

Figura 33 — Tubos sonoros fechados.



Fonte: Adaptado de Irigoyen (2020).

Sabendo que para $n=1$, $\lambda=4L$, para $n=3$, $\lambda=4L/3$, para $n=5$, $\lambda=4L/5$, ..., de maneira genérica podemos dizer que

$$\lambda_n = \frac{4L}{n}$$

$$n = (1, 3, 5, 7, \dots)$$

A partir da equação fundamental da ondulatória, podemos dizer que

$$v = \lambda \cdot f$$

$$v = \frac{4L}{n} \cdot f$$

Logo,

$$f_n = n \cdot \frac{v}{4L} \quad (5)$$

2.6.2 Pressão sonora

É a pressão gerada pelas zonas de compressão de uma onda sonora. Sabendo que a pressão P é a razão entre força aplicada F e a área que sofre a força A , temos que

$$P = \frac{F}{A} \quad (6)$$

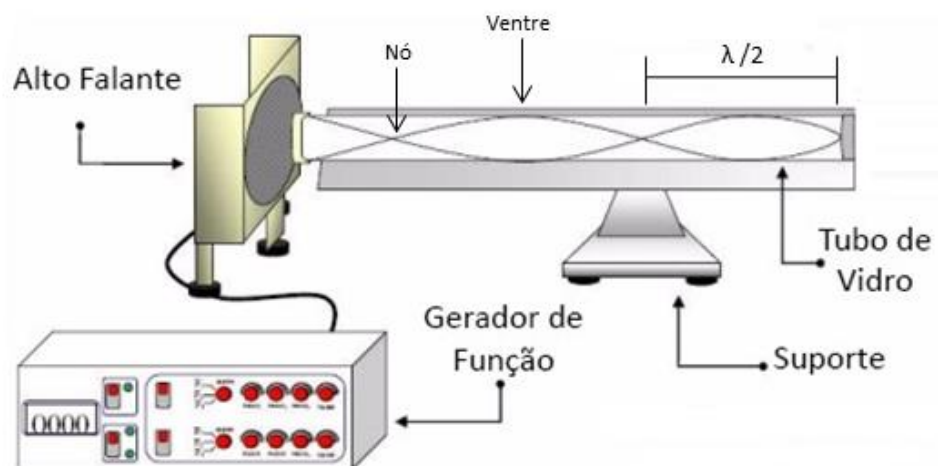
Então podemos dizer que um corpo sujeito a uma pressão, sofrerá uma força proporcional à pressão e à área do corpo exposta à pressão.

$$F = P \cdot A \quad (7)$$

2.6.3 Tubo de Kundt

O tubo de Kundt é o experimento em que um êmbolo (ou um alto-falante) oscila com uma frequência f , produzindo uma onda sonora dentro de um tubo que contém pó de cortiça (ou algo semelhante), por uma de suas extremidades. Essa onda é refletida pela extremidade fechada deste tubo, formando uma onda estacionária no seu interior. Com isso, podemos ver que haverá um acúmulo de pó nas regiões de baixa pressão (representadas pelos nós da onda estacionária). Isto ocorre, pois o pó que se encontra nos pontos onde ocorrem as regiões de alta pressão (representadas pelos ventres da onda estacionária), sofre uma força e é deslocado para as regiões de baixa pressão.

Figura 34 — Tubo de Kundt.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2022, p.10).

2.7 ONDAS ESTACIONÁRIAS ACÚSTICAS

2.7.1 Experimento 3: Levitação acústica

A levitação acústica é o processo de suspender objetos através da força de radiação acústica produzida por uma onda estacionária, que quando aplicada sobre um objeto, na mesma direção, porém, em sentido oposto à gravidade, se contrapõe à sua força peso. Isso possibilita que este objeto fique suspenso em um dos pontos de baixa pressão, que são representados pelos nós da onda estacionária.

Para isso, dois transdutores ultrassônicos devem ser posicionados a uma distância L um do outro, de modo que esta distância seja adequada para gerar uma onda estacionária. E para calcular L , nós precisamos saber o comprimento de onda λ das ondas que serão emitidas pelos transdutores, que pode ser obtido através da equação fundamental da ondulatória

$$v = \lambda \cdot f$$

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Por conta da simetria da montagem do experimento, na direção vertical o levitador acústico se assemelha a um tubo sonoro aberto. Sendo assim, podemos calcular a distância L da seguinte maneira:

$$f = \frac{n \cdot v}{2L}$$

$$L = \frac{n}{2} \cdot \frac{v}{f}$$

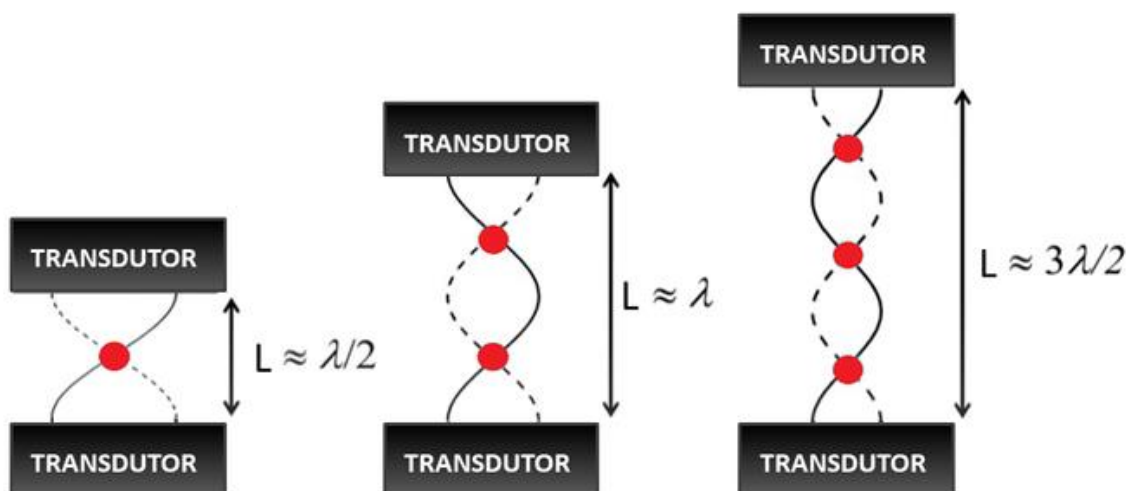
$$L = \frac{n}{2} \cdot \lambda$$

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$n = (1, 2, 3, \dots)$$

Logo, a distância L para que seja possível gerar uma onda estacionária, deve ser aproximadamente um múltiplo inteiro de meio comprimento de onda λ .

Figura 35 — Modelo de levitador acústico.



Fonte: Adaptado de Andrade (2018).

Para montar o levitador acústico, eu utilizei uma placa geradora de sinal, uma placa amplificadora de sinal e dois transdutores⁶. A placa geradora de sinal, alimentada por uma tensão de 12 volts, envia o sinal para a placa amplificadora, também alimentada por uma tensão de 12 volts, que por sua vez, envia o sinal amplificado para os transdutores, que foram acoplados em um suporte improvisado (figura 36).

Figura 36 — Esquema da montagem do levitador acústico.



Fonte: O autor (2022).

⁶ Placa geradora de sinal: gerador de sinal PWM 1 Hz – 150 kHz; placa amplificadora de sinal: amplificador PAM 8610 2x10 W; transdutores: transdutor ultrassônico HC-SR04.

Assumindo que a velocidade do som no ar é de 340 m/s, eu gerei uma frequência de 40 kHz e calculei o comprimento de onda λ , para que fosse possível ajustar a distância L entre os transdutores adequada para gerar uma onda estacionária.

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

$$\lambda = \frac{340}{40.000}$$

$$\lambda = 0,0085 \text{ m}$$

Então, eu ajustei a distância L entre os transdutores para 0,03 m, que corresponde aproximadamente ao sétimo harmônico.

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$L = 7 \cdot \frac{0,0085}{2}$$

$$L = 0,02975 \text{ m} \cong 0,03 \text{ m}$$

Após realizar a montagem, podemos seguir para a demonstração.

Na primeira parte da demonstração, eu utilizei três pedaços de papel seda, cortados em formato retangular, que foram posicionados em três nós distintos da onda estacionária e, conseqüentemente, suspensos no ar (figura 37).

Figura 37 — Levitador acústico (Demonstração 1).



Fonte: O autor (2022).

Na segunda parte, eu utilizei um tira do mesmo papel e a posicionei em diferentes pontos entre os transdutores, com o intuito de mostrar que ela só consegue permanecer em determinados pontos, que são os nós da onda estacionária (zonas de baixa pressão). Com isso é possível ver que a tira de papel se movimenta como se estivesse subindo e descendo degraus (figura 38).

Figura 38 — Levitador acústico (Demonstração 2).



Fonte: O autor (2022).

Na terceira parte, sabendo que a distância entre cada nó da onda estacionária é equivalente a meio comprimento de onda, eu posicionei uma régua, para que fosse possível fazer uma comparação entre $\lambda/2$, que vale 0,00425 m, e a distância entre dois pedaços de papel consecutivos, que como se pode ver na figura 13, é da ordem de 0,0050 m, um valor próximo do esperado. Esse valor deve ser ainda mais próximo do valor esperado se levarmos em consideração que foi necessário posicionar régua a uma certa distância atrás dos pedaços de papel, o que introduz um erro de perspectiva para mais na medida (figura 39).

Figura 39 — Levitador acústico (Demonstração 3).



Fonte: O autor (2022).

Segundo a teoria de Gor'Kov (ANDRADE et al, 2015), a chamada força de radiação acústica, para objetos esféricos, levitados em ar, onde a densidade do objeto é muito maior que a densidade do fluido, pode ser calculada através do potencial da força de radiação acústica U , dado por:

$$U = \frac{4}{3}\pi R^3 \left[\frac{\langle p^2 \rangle}{2\rho c^2} - \frac{3\rho \langle u^2 \rangle}{4} \right] \quad (8)$$

Onde R é o raio da esfera, p é a pressão acústica, ρ é a densidade do fluido (que neste caso é o ar), c é a velocidade de propagação da onda sonora, u é a velocidade do fluido e $\langle \rangle$ representa a média temporal.

Mas como eu utilizei um objeto de superfície plana ao invés de uma esfera, acho plausível propor a seguinte substituição:

$$U = a^2 h \left[\frac{\langle p^2 \rangle}{2\rho c^2} - \frac{3\rho \langle u^2 \rangle}{4} \right] \quad (9)$$

Onde a é a medida do lado do papel que foi levantado no experimento e h é a sua altura, dessa forma substituindo o volume da esfera pelo volume do papel.

Dado o potencial U , a força de radiação acústica F pode ser descrita como o negativo do gradiente deste potencial.

$$\vec{F} = -\vec{\nabla}U \quad (10)$$

Como p^2 e u^2 são funções periódicas, a média temporal pode ser calculada considerando o período T .

$$\begin{aligned} \langle p^2 \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T [A \cos(\omega t) \cos(kz)]^2 dt = \\ &= \frac{1}{2} [A \cos(kz)]^2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \langle u^2 \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T u_z^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{A}{\rho c} \sin(\omega t) \sin(kz) \right]^2 dt = \\ &= \frac{1}{2} \left[\frac{A}{\rho c} \sin(kz) \right]^2 \end{aligned} \quad (12)$$

Onde $\omega=2\pi f$ é a frequência angular, $k=\omega/c$ é o número de onda e A é a amplitude de pressão da onda.

Substituindo os resultados de $\langle p^2 \rangle$ e $\langle u^2 \rangle$ em U , temos que

$$U = \frac{a^2 h A^2}{2 \rho c^2} \left[\frac{\cos^2(kz)}{2} - \frac{3 \sin^2(kz)}{4} \right] \quad (13)$$

Logo, a força de radiação acústica F na direção z , pode ser obtida da seguinte maneira

$$F_z = -\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{5a^2 h A^2 k}{8 \rho c^2} \sin(2kz) \quad (14)$$

Sabendo que a força gravitacional de um objeto pode ser descrita pelo seu volume, sua densidade e pela gravidade, temos que

$$F_g = mg = a^2 h \rho_{obj} g \quad (15)$$

Sabendo que a densidade do objeto é muito superior à densidade do ar (meio em que ocorre a levitação), podemos desprezar o empuxo e assim a amplitude mínima necessária de pressão A_{min} para levar um objeto, pode ser obtida da seguinte maneira

$$\frac{5a^2 h A_{min}^2 k}{8 \rho c^2} \geq a^2 h \rho_{obj} g \quad (16)$$

Logo,

$$A_{min} \geq \sqrt{\frac{8}{5} \frac{\rho_{obj} \rho c^2 g}{k}} \quad (17)$$

Então, sabendo que a densidade do papel seda ρ_{obj} é de 285,71 kg/m³, que a densidade do ar ρ é de 1,2 kg/m³, que a velocidade de propagação da onda c é de 340 m/s, que a aceleração da gravidade g é de 9,8 m/s² e que a frequência utilizada foi de 40 kHz, temos que, a amplitude mínima necessária de pressão A_{min} para levitar o pedaço de papel que foi utilizado, deve ser

$$A_{min} = 916,9 \text{ Pa}$$

Uma maneira alternativa de calcular a pressão sonora produzida pelo levitador acústico é relacionando o nível de pressão sonora (NPS) com o nível de potência sonora (NWS) (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO), da seguinte forma:

$$NPS = 20 \log \left(\frac{p}{p_o} \right) \quad (18)$$

$$NWS = 10 \log \left(\frac{W}{W_o} \right) \quad (19)$$

$$NPS = NWS - 20 \log(r) - 11 \quad (20)$$

Onde p é a pressão sonora, p_o é a pressão sonora de referência, que é de 2×10^{-5} Pa (N/m²), W é a potência sonora da fonte, W_o é a potência sonora de referência, que é de 10^{-12} watts e r é a distância do objeto a ser levitado até a fonte sonora em metros.

Então, substituindo NPS e NWS na equação que os relaciona, temos

$$20\log\left(\frac{p}{p_o}\right) = 10\log\left(\frac{W}{W_o}\right) - 20\log(r) - 11 \quad (21)$$

Logo, podemos calcular p da seguinte maneira

$$p = 10^{(10\log(W/W_o) - 20\log(r) - 11)/20} p_o \quad (22)$$

Como a distância entre os transdutores é de aproximadamente 0,03 m, eu optei por adotar uma distância r de 0,015 m, para que ficasse equidistante dos transdutores. E sabendo que, segundo o fabricante, a placa amplificadora produz uma potência W de 10 watts, temos que

$$p = 1.188,3 \text{ Pa}$$

Esta pressão é gerada por cada um dos transdutores, logo, para obter a pressão gerada pelo levitador P acústico, devemos dobrar este valor.

$$P = 2.376,6 \text{ Pa}$$

Com isso, podemos ver que a pressão gerada pelo levitador P , é cerca de 2,6 vezes superior à amplitude mínima necessária de pressão A_{min} , calculada a partir da teoria de Gor'Kov, conforme a adaptação feita neste trabalho.

Vale ressaltar que este método utilizado para calcular a pressão gerada pelo levitador P nos dá apenas uma aproximação do resultado, visto que esta fórmula é proposta para campos livres e não para um regime estacionário como o que se estabelece no experimento. Além disso, nos cálculos foi utilizada a potência nominal dos transdutores sem considerar as perdas de energia, visto desconhecemos a eficiência real da transdução. Porém, dessa maneira ainda é possível obter uma estimativa realista do problema.

Para finalizar este experimento, através das fórmulas $F=P.A$ e $F_g=a^2h\rho_{obj}g$, sabendo que a vale 2×10^{-3} m e h vale $0,07 \times 10^{-3}$ m⁷, eu calculei e comparei a força máxima produzida pela pressão gerada pelo levitador P com a força gravitacional do pedaço de papel que foi levantado F_g .

$$F = 2376,6 \cdot 4 \times 10^{-6} = 0,0095 \text{ N} = 9,5 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_g = 4 \times 10^{-6} \cdot 0,07 \times 10^{-3} \cdot 285,7 \cdot 9,8 = 0,00000078 \text{ N} = 0,00078 \times 10^{-3} \text{ N}$$

Assim podemos ver que a força máxima produzida pela pressão gerada pelo levitador P é suficiente para suportar a força gravitacional do pedaço de papel que foi levantado F_g , sendo muito superior.⁸

⁷ Este valor foi achado medindo a altura de 20 folhas do mesmo papel (com um paquímetro) e dividindo pela quantidade de folhas.

⁸ Vale ressaltar que o objeto levantado sempre se estabiliza um pouco abaixo do nó de pressão da onda estacionária, devido ao seu peso e que este caso pode ser comparado a um sistema massa mola, onde a força de radiação acústica age como uma força restauradora.

2.7.2 Experimento 4: Levitação aerodinâmica

Eu realizei este experimento em que uma bola de "ping-pong" fica suspensa sobre um secador de cabelo, para poder mostrar que, no caso da levitação acústica, não é um fluxo de ar, através da força de arrasto, quem suspende o objeto, como acontece neste caso.

Na primeira parte deste experimento, eu coloquei a bola de "ping-pong" em diferentes posições (no eixo vertical z) sobre o fluxo de ar, para podermos ver que diferentemente da levitação acústica, onde o objeto pode ser levitado em diversos pontos, a bola de "ping-pong" tende a estabilizar-se sempre no mesmo ponto (figura 40).

Figura 40 — Levitação aerodinâmica.



Fonte: O autor (2022).

A força de arrasto F_d pode ser descrita da seguinte forma:

$$F_d = \frac{1}{2} C \rho A V^2 \quad (23)$$

Onde C é o coeficiente de arrasto, ρ é a densidade do fluido, A é área de seção transversal ao fluxo e V é a velocidade do fluido.

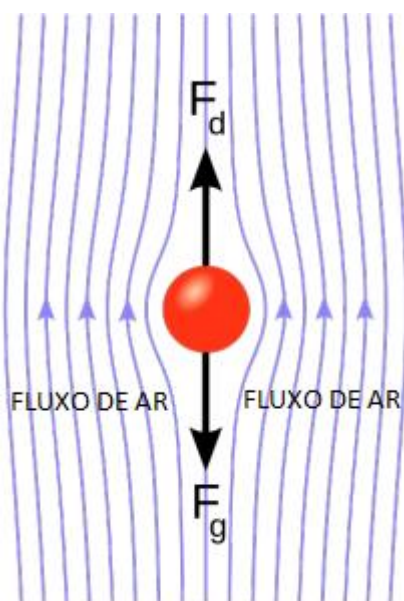
Igualando esta força com a força gravitacional do objeto, de modo que a força resultante sobre o objeto seja zero, podemos calcular a velocidade do fluxo de ar necessária para suspender de maneira estável este objeto.

$$\frac{1}{2} C \rho A V^2 = mg \quad (24)$$

$$V = \sqrt{\frac{2mg}{C\rho A}} \quad (25)$$

Conforme o fluxo de ar se afasta do secador, ele perde energia cinética, de modo que, quanto mais próximo do secador, mais velocidade terá o fluxo de ar. Logo, o ponto de estabilidade do objeto será o ponto onde o fluxo de ar tem a velocidade que gera uma força de arrasto que se iguala à força gravitacional do objeto.

Figura 41 — Força de arrasto e força gravitacional agindo sobre o objeto.



Fonte: Adaptado de Schneider (2022).

Então, utilizando um anemômetro eu verifiquei a velocidade do fluxo de ar em pontos mais próximos (1) e mais distantes (2) da saída de ar do secador de cabelo, incluindo o ponto onde a bola de "ping-pong" se mantém estável (3). Como o fluxo de ar não é perfeitamente laminar, a bola de "ping-pong" não se mantém exatamente fixa em um ponto estável: ela varia a sua posição em torno de um ponto fixo, que seria o ponto de estabilidade. Com isso eu verifiquei a velocidade do fluxo em um ponto médio da região em que a bola de "ping-pong" se mantém suspensa (figura 42).

Figura 42 — Verificando velocidade do fluido com um anemômetro.



Fonte: O autor (2022).

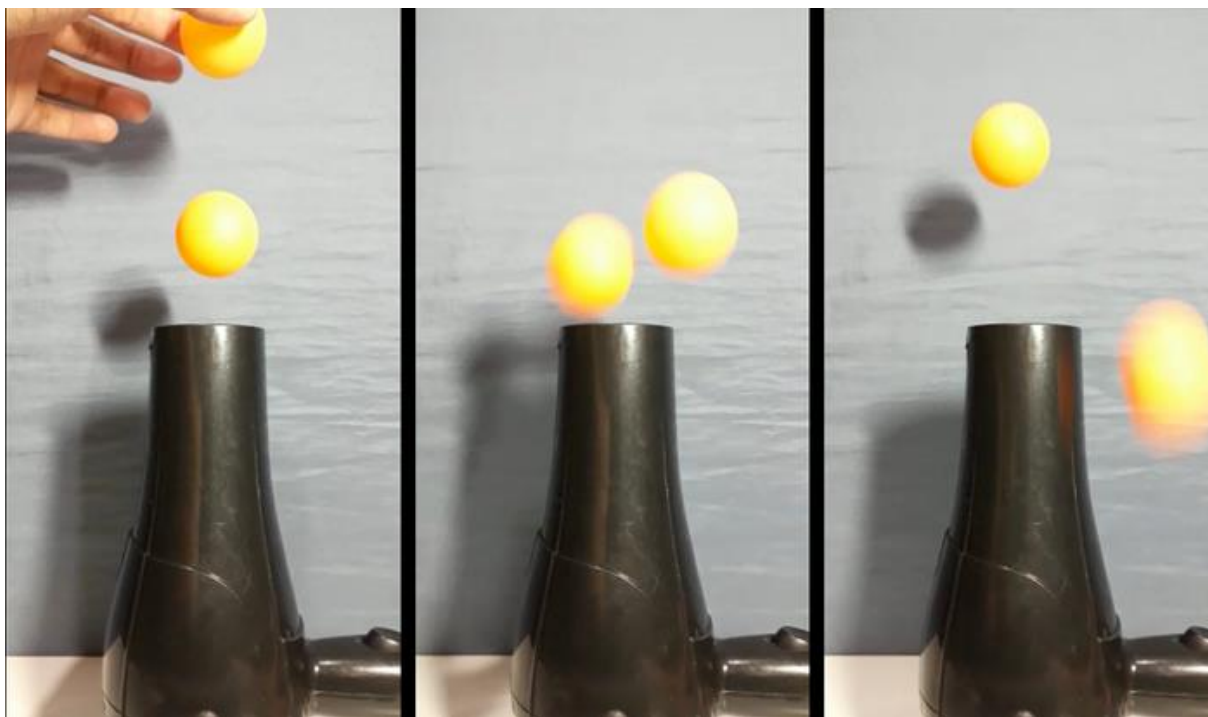
Sabendo que a massa da bola de "ping-pong" m vale 0,003 kg, que a aceleração da gravidade g vale $9,8 \text{ m/s}^2$, que o coeficiente de arrasto C vale 0,47, que a densidade do fluido (ar) ρ para temperaturas entre 35°C e 40°C vale $1,14 \text{ kg/m}^3$ e que a área de seção transversal ao fluxo A vale $1,225 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, temos pela teoria, que a velocidade do fluxo de ar V necessária para suspender de maneira estável a bola de "ping-pong" é

$$V = 9,46 \text{ m/s}$$

No ponto (3), apesar de variar um pouco a velocidade, vemos que o anemômetro chega a registrar a velocidade de 9,4 m/s, além de velocidades próximas a este valor, obtendo um resultado de $(9,3 \pm 0,2) \text{ m/s}$, compatível com o resultado calculado pela teoria.

Na segunda parte, eu tentei colocar duas bolas de "ping-pong" juntas e, mais uma vez, diferentemente da levitação acústica, como só existe um ponto de estabilidade, só é possível suspender um objeto por vez, já que ambos não podem ocupar o mesmo espaço (figura 43).

Figura 43 — Tentativa de suspender dois objetos simultaneamente.



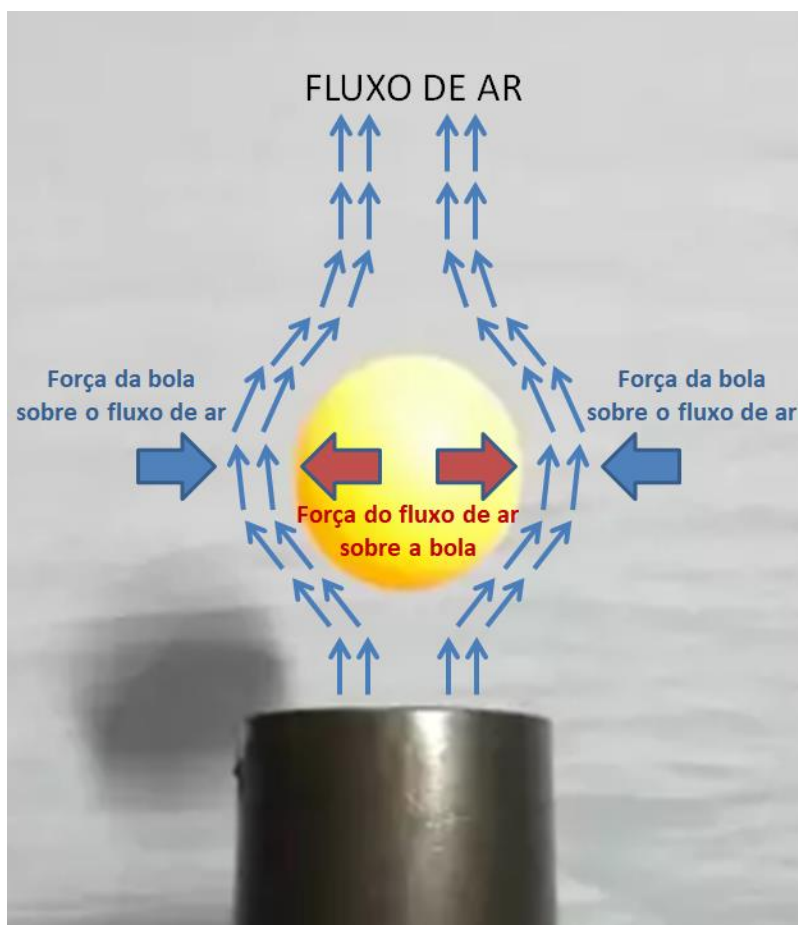
Fonte: O autor (2022).

Este experimento funciona através da transferência de momento linear das partículas de ar para o objeto e, não envolve um fenômeno ondulatório, como no experimento da levitação acústica.

Devido ao efeito Coanda, que é a tendência que um fluxo de fluido tem de aderir e acompanhar o formato curvo da superfície de objetos, além de se estabilizar em um ponto no eixo vertical z , a bola de "ping-pong" também consegue se estabilizar em um ponto do plano horizontal perpendicular ao fluxo de ar, que fica sobre o centro da saída de ar do secador de cabelo.

Para acompanhar o formato curvo da superfície da bola de "ping-pong", o fluxo de ar, que até então se movimentava em linha reta, ganha uma aceleração centrípeta, devido à força centrípeta aplicada pela superfície da bola. Logo, pela terceira lei de Newton, se a superfície da bola aplica uma força sobre o fluxo de ar, o fluxo de ar aplica uma força de mesma intensidade e direção, porém, de sentido oposto, sobre a superfície da bola, conservando o momento linear do sistema.

Figura 44 — Efeito Coanda agindo sobre um objeto centralizado.

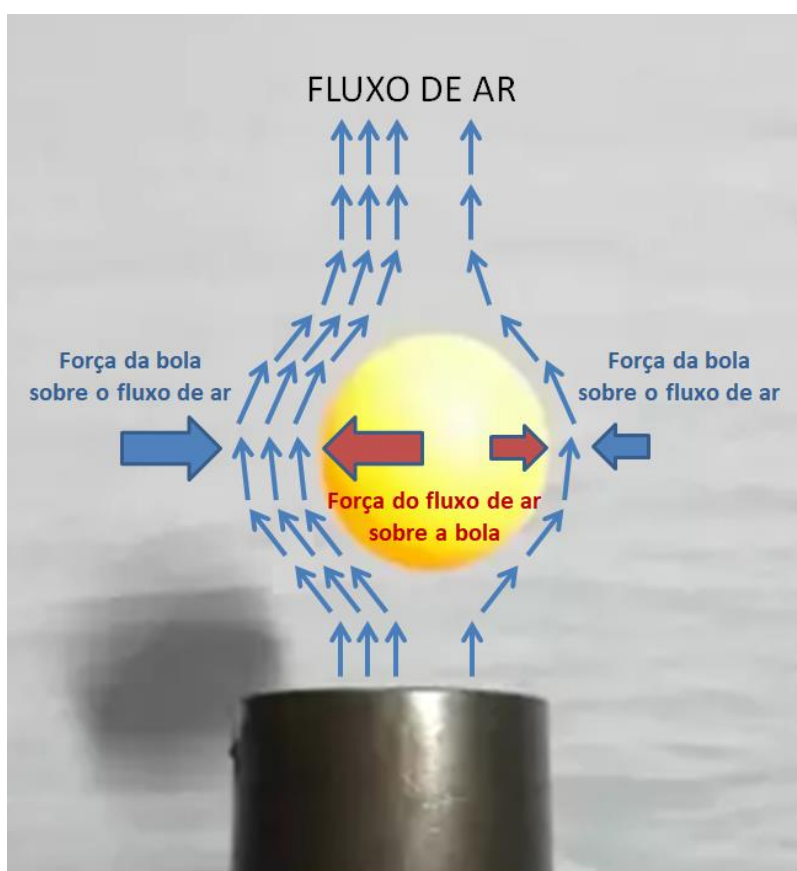


Fonte: O autor (2022).

Neste caso, como a bola de "ping-pong" se encontra sobre o centro da saída de ar do secador de cabelo, a intensidade do fluxo de ar que contorna a bola é simétrica e, portanto, as forças que agem sobre a bola e sobre o fluxo de ar, têm a mesma intensidade e direção, porém sentidos opostos, o que faz com que a bola permaneça em um ponto estável (figura 44).

Se a bola de "ping-pong" se afastar do centro da saída de ar do secador de cabelo, sobre o plano horizontal perpendicular ao fluxo de ar, o fluxo de ar que passa do lado da bola mais próximo do centro será mais intenso que o fluxo de ar que passa do lado oposto. Isso vai fazer com que a força aplicada pela superfície da bola sobre o fluxo de ar seja mais intensa onde o fluxo é mais intenso, devido à quantidade de massa de ar que será defletida. Dessa maneira, será gerada uma força resultante, diferente de zero, que fará a bola se mover de volta para o ponto de estabilidade (figura 45).

Figura 45 — Efeito Coanda agindo sobre um objeto não centralizado.



Fonte: O autor (2022).

2.8 ONDAS ESTACIONÁRIAS ÓPTICAS

2.8.1 Levitação óptica de cargas elétricas

Analogamente à levitação acústica, podemos propor a levitação óptica de cargas elétricas, onde um feixe de luz de frequência (f) emitido por um laser é refletido no sentido oposto por uma superfície posicionada a uma distância (L) do laser, que corresponde a um múltiplo de meio comprimento de onda do feixe emitido, de modo que seja formada uma onda estacionária.

Ao interagir com um campo elétrico, uma carga elétrica sofre uma força descrita por

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot Q \quad (26)$$

Onde F é a força que o campo elétrico E exerce sobre a carga Q .

Ao sofrer esta força, de acordo com a segunda lei de Newton, a carga ganha uma aceleração na direção do campo elétrico, sendo no mesmo sentido se a carga for positiva e, no sentido oposto se a carga for negativa.

Cargas elétricas que possuem velocidade, ao interagir com um campo magnético, sofrem uma força descrita por:

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{V} \times \vec{B} \quad (27)$$

Onde F é a força que o campo magnético produz sobre a carga, V é a velocidade da carga e B é o campo magnético.

Como existe um produto vetorial entre V e B , podemos reescrever a fórmula da seguinte maneira

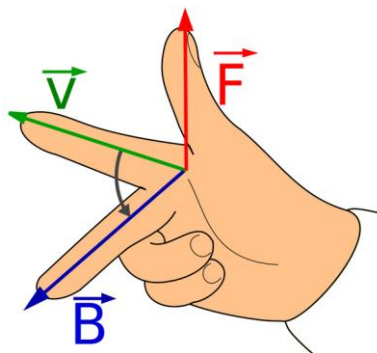
$$F = Q \cdot V \cdot B \cdot \text{sen}(\theta) \quad (28)$$

Onde θ é o ângulo entre o vetor velocidade e o vetor campo magnético.

Com isso, podemos perceber que se a carga possuir uma velocidade na mesma direção do campo magnético ($\theta=0^\circ$ ou $\theta=180^\circ$), o seno do ângulo θ será zero e, conseqüentemente, a força produzida pelo campo magnético sobre a carga, também.

Uma maneira de acharmos o sentido da força que é produzida pelo campo magnético é através da regra da mão direita, na qual os dedos polegar, indicador e médio apontam em direções perpendiculares entre si, onde o indicador aponta no sentido da velocidade da carga elétrica, o médio no sentido do campo magnético e o polegar mostra o sentido da força (figura 46).

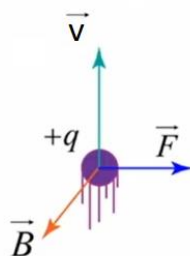
Figura 46 — Regra da mão direita.



Fonte: Adaptado de Regra... (2022).

Ou seja, sabendo o sentido do campo magnético e o sentido da velocidade perpendicular ao campo, podemos saber o sentido da força que o campo produzirá sobre um próton, por exemplo (figura 47).

Figura 47 — Força magnética sobre um próton.

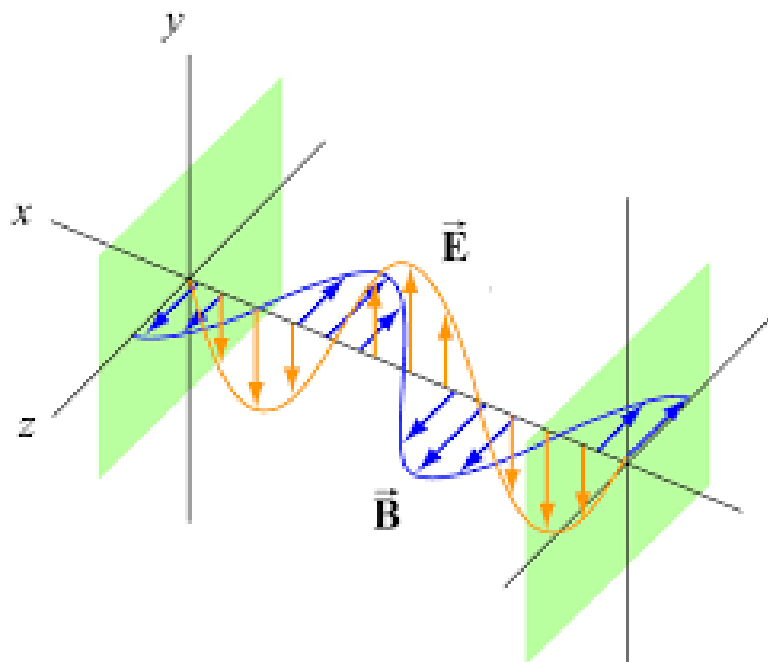


Fonte: Adaptado de Eduardo (2020).

Logo, quando um feixe de luz incide sobre uma carga em repouso, ela sofre uma força produzida pelo campo elétrico E , acelera e ganha velocidade e, como consequência, sofre uma força produzida pelo campo magnético B .

Uma peculiaridade da onda eletromagnética estacionária, é que o campo magnético fica defasado em relação ao campo elétrico em 90° (ou $\pi/2$), de modo que onde ocorre uma crista ou um vale do campo elétrico, ocorre um nó do campo magnético e vice versa (figura 48). Esta peculiaridade pode ser explicada pelas condições de contorno do campo magnético ou até mesmo por uma questão de conservação de energia da onda eletromagnética.

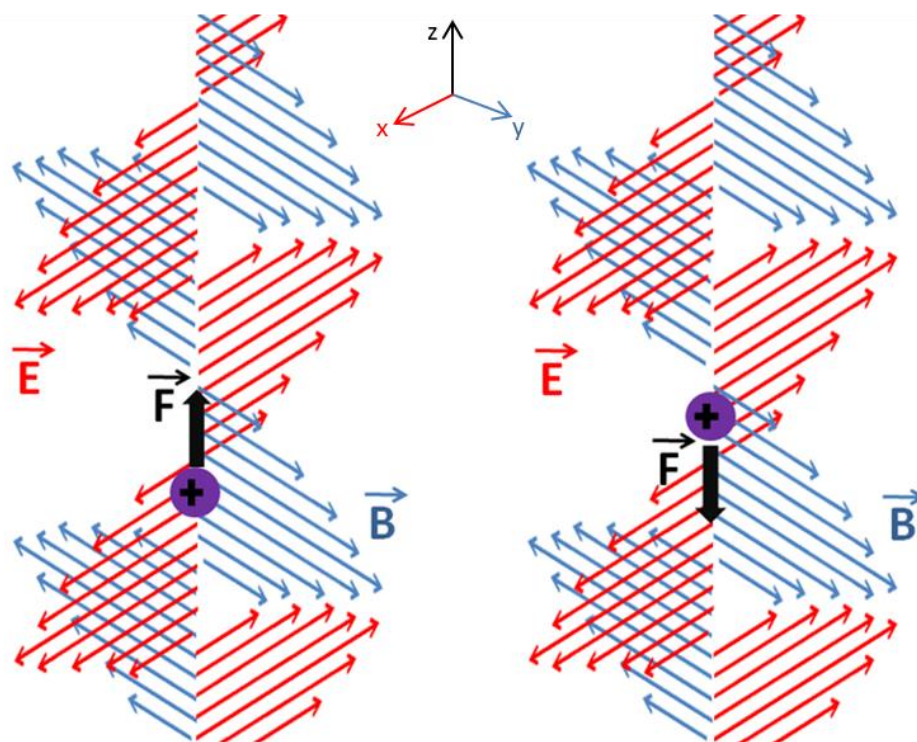
Figura 48 — Onda eletromagnética estacionária.



Fonte: Adaptado de Massachusetts Institute of Technology (2022, p.15).

Logo, se colocarmos um próton (carga elétrica positiva), por exemplo, em um dos nós do campo elétrico de uma onda estacionária que se encontra sobre o eixo vertical, na medida em que o próton é atraído pela força gravitacional, ele começa a interagir com o campo elétrico e ganha velocidade na direção do mesmo. Então, o próton que agora tem uma velocidade perpendicular ao campo magnético, sofre uma força no sentido oposto ao sentido da gravidade, fazendo com que ele seja empurrado para cima. Contudo, se por algum motivo o próton atravessar para o lado de cima do nó do campo elétrico, que agora se encontra no sentido oposto, ele ganhará velocidade neste novo sentido. Mas como o campo magnético neste ponto ainda aponta para o mesmo sentido que apontava anteriormente, o próton agora sofrerá uma força no mesmo sentido da gravidade, fazendo com que ele seja empurrado novamente para baixo (figura 49).

Figura 49 — Próton aprisionado pela força magnética em uma onda estacionária eletromagnética.



Fonte: O autor (2022).

Dessa forma, o próton ficará suspenso em uma região próxima ao nó do campo elétrico da onda estacionária, de maneira análoga a um objeto que fica suspenso no nó de pressão da onda sonora estacionária no experimento da levitação acústica.

Este mesmo experimento poderia ser feito com um elétron (carga elétrica negativa). Mas ao invés de levitar em uma região próxima ao nó do campo elétrico, levitaria em uma região próxima ao nó do campo magnético.

2.8.2 Força e pressão de radiação da luz

Da mesma maneira que calculamos a força e a pressão no experimento da levitação acústica, podemos calcular a força e a pressão exercida por um feixe de luz.

Segundo a teoria da relatividade de Albert Einstein (1879-1955), a energia pode ser descrita através da seguinte equação:

$$E^2 = (mc)^2 + (pc)^2 \quad (29)$$

Onde m é a massa de repouso, c é a velocidade da luz e p é o momento linear.

Como a luz não possui massa de repouso, temos que

$$E^2 = (pc)^2 \quad (30)$$

E como os dois termos estão elevados ao quadrado, podemos reescrever a equação da seguinte forma

$$E = pc \quad (31)$$

Logo, podemos definir o momento linear da luz como

$$p = \frac{E}{c} \quad (32)$$

A variação do momento linear quando ocorre absorção total da luz, pode ser descrita da seguinte maneira

$$\Delta p = \frac{\Delta E}{c} \quad (33)$$

Sabendo que a força resultante é dada por

$$\vec{F}_r = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} \quad (34)$$

Onde Δt é a variação do tempo.

Que a intensidade é dada por

$$I = \frac{Pot}{A} \quad (35)$$

Onde Pot é a potência do feixe de luz e A é a área sobre qual a luz incide perpendicularmente.

E que a potência é dada por

$$Pot = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (36)$$

Podemos dizer que

$$\Delta E = I \cdot A \cdot \Delta t \quad (37)$$

Então, a força resultante quando ocorre absorção total pode ser calculada da seguinte maneira

$$F_r = \frac{\Delta E}{c \cdot \Delta t} = \frac{I \cdot A \cdot \Delta t}{c \cdot \Delta t} = \frac{I \cdot A}{c} \quad (38)$$

Logo, sabendo que a pressão é a razão entre força e área ($P=F/A$), a pressão de radiação quando ocorre absorção total é dada por

$$p_r = \frac{I}{c} \quad (39)$$

Para os casos onde ocorre reflexão total da luz, a variação do momento linear pode ser descrita da seguinte maneira

$$\Delta p = \frac{2\Delta E}{c} \quad (40)$$

E a força resultante quando ocorre reflexão total pode ser calculada da seguinte maneira

$$F_r = \frac{2 \cdot \Delta E}{c \cdot \Delta t} = \frac{2 \cdot I \cdot A \cdot \Delta t}{c \cdot \Delta t} = \frac{2 \cdot I \cdot A}{c} \quad (41)$$

Logo, a pressão de radiação quando ocorre reflexão total é dada por

$$p_r = \frac{2I}{c} \quad (42)$$

Qualquer valor que esteja entre os valores determinados para os casos de absorção total e reflexão total, são referentes aos casos onde a absorção e a reflexão são parciais.

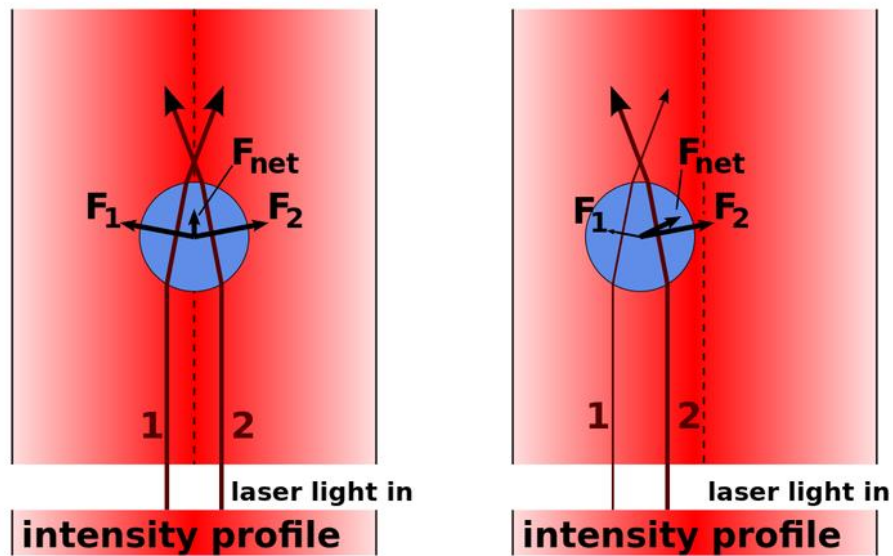
2.8.3 Levitação óptica de dielétricos (armadilhas ópticas)

A armadilha óptica ou levitação óptica (quando ocorre no vácuo ou no ar) é uma tecnologia que, em uma de suas aplicações, permite aprisionar em um feixe de luz, partículas dielétricas (na ordem de nano ou micrometros) cujo diâmetro seja superior ao comprimento de onda.

Na medida em que um feixe de luz gaussiano (mais intenso no centro do que nas bordas) atravessa uma partícula dielétrica, que pode ser uma esfera de vidro, por exemplo, ele é refratado e sofre uma mudança em sua direção de propagação. Considerando que a luz possui momento linear, e que o momento do sistema deve ser conservado, na medida em que a esfera de vidro altera o momento da luz, a luz altera o momento da esfera, na mesma direção, porém, no sentido oposto.

Se por qualquer motivo a esfera de vidro se afasta do centro do feixe de luz, a parte mais intensa do feixe que é refratada gera mais impulso, que é a variação do momento linear, sobre a esfera, do que a parte menos intensa do feixe. Isso faz com que a esfera de vidro sofra uma força restauradora, que tende a mantê-la no centro do feixe gaussiano (figura 50).

Figura 50 — Armadilha óptica.



Fonte: (KOEBLER, 2011).

Como vimos, uma parte da luz é refratada e espalhada, porém, há uma parte que é absorvida pela esfera, transferindo momento para a mesma. Isso significa que esta combinação também gera uma força sobre a esfera que a empurra no sentido de propagação do feixe. Contudo, se o feixe de luz estiver sobre o eixo vertical, a força gravitacional da esfera irá se contrapor à força que a empurra no sentido de propagação do feixe, de modo que ela tenderá a permanecer em um ponto estável. Mas para que isso seja possível, a intensidade do feixe de luz deverá ser ajustada para poder gerar uma força que se iguale à força gravitacional da esfera.

Apenas para exemplificar e supondo que o feixe de luz seja totalmente absorvido, igualando a força produzida pelo feixe com a força gravitacional da esfera, podemos calcular a intensidade do feixe necessária para levar a esfera.

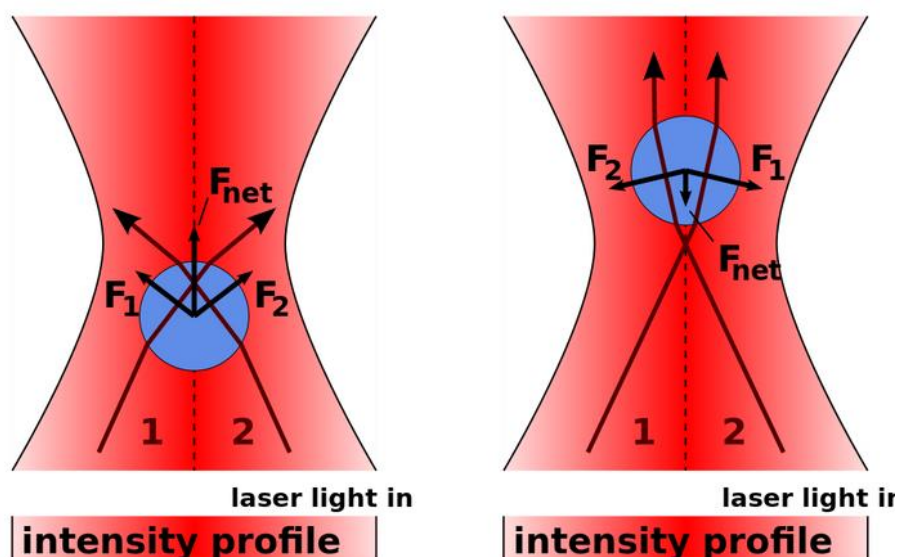
$$\frac{I \cdot A}{c} = mg \quad (43)$$

$$I = \frac{mgc}{A} \quad (44)$$

Logo, é possível fazer uma analogia de uma armadilha óptica com o experimento da levitação aerodinâmica, onde o feixe de luz se comporta como o fluxo de ar, de modo a manter o objeto suspenso e a refração se assemelha ao efeito Coanda, de modo a manter o objeto sempre no centro.

Uma maneira mais eficaz, que permite aprisionar um dielétrico em qualquer direção além da vertical, é através da utilização de um feixe de luz gaussiano e focalizado, de modo que a força resultante ocasionada pela refração da luz sempre apontará para o foco do feixe. Dessa maneira, o dielétrico será aprisionado em um ponto próximo ao foco, onde esta força compensa a força que o empurra no sentido de propagação do feixe (figura 51).

Figura 51 — Armadilha óptica com feixe focalizado.



Fonte: (KOEBLER, 2011).

2.9 A LUZ COMO PARTÍCULA

Em um dado momento deste trabalho, podemos ver que a luz possui momento linear. Isso nos mostra que além de uma natureza ondulatória, a luz também possui uma natureza corpuscular, podendo, em alguns casos, ser descrita como partícula. Já no século XX, em 1905, Einstein, utilizando a teoria da quantização da luz, proposta por Max Planck (1858-1947), recuperou a teoria de uma natureza corpuscular da luz ao explicar o efeito fotoelétrico, descoberto por Hertz, onde a emissão de luz é capaz de ejetar, com uma certa energia cinética, elétrons de um determinado material. Assumindo a luz como partícula, Einstein mostrou que os elétrons só podem ser ejetados por fótons (partículas de luz) que possuem uma determinada energia e, conseguiu explicar o fato da energia cinética dos elétrons ejetados só depender da frequência da luz emitida e da intensidade da luz alterar apenas a quantidade de elétrons ejetados e não a energia cinética com que eles são ejetados, onde cada fóton é responsável por ejetar um elétron. Ou seja, uma luz mais intensa possui uma maior quantidade de fótons.

Segundo Einstein, a energia de um fóton pode ser calculada da seguinte maneira

$$E = h \cdot f \quad (45)$$

Onde h é a constante de Planck e f é a frequência da luz emitida.

Logo, podemos perceber que Newton também tinha razão ao dizer que a luz apresenta um comportamento de natureza corpuscular. E a este comportamento dual, a física moderna deu o nome de dualidade onda-partícula.

2.10 PROPOSTA DE AÇÃO PEDAGÓGICA

O intuito deste trabalho não é estabelecer um roteiro a ser seguido, e sim trazer um conjunto de experimentos que podem ser adaptados conforme a necessidade do docente. Citarei aqui algumas sugestões de como abordá-los.

O experimento da interferência sonora poderia ser aplicado tanto em laboratório quanto em sala, para poder demonstrar de forma visual o comportamento ondulatório do som, cabendo ao docente avaliar o melhor momento para aplicá-lo.

O mesmo se pode dizer do experimento da interferência luminosa. Porém, apesar de poder ser aplicado de forma isolada, seria interessante aplicá-lo em conjunto com o experimento da interferência sonora, justamente para que possa ser feita uma comparação e uma analogia entre o comportamento ondulatório do som e o comportamento ondulatório da luz.

O experimento da levitação acústica é interessante, pois tem um "impacto" visual que pode causar um certo interesse por parte dos alunos, além de aproximá-los de tecnologias mais recentes. Apesar de poder ser apresentado tanto em laboratório quanto em sala, seria interessante talvez que fosse trabalhado em um projeto de feira de ciências ou algo do tipo.

O experimento da levitação aerodinâmica inicialmente foi proposto para demonstrar que a levitação acústica não funciona com um simples fluxo de ar, porém, pode ser aplicado durante o estudo de fluidos e força de arrasto, além de apresentar fenômenos pouco mencionados como o efeito Coanda. Esses dois últimos experimentos estão disponíveis no acervo do Laboratório Didático do Instituto Física (LADIF) da UFRJ, onde docentes interessados podem realizar visitas monitoradas com os alunos.

Por necessitar de um aparato experimental mais complexo, os experimentos de levitação óptica podem ser trabalhados de maneira teórica e, assim como a levitação acústica, a levitação óptica também aproxima os alunos de tecnologias mais recentes. É interessante que este experimento seja trabalhado em conjunto com o experimento da levitação acústica e o experimento da levitação aerodinâmica, para que possa justamente ser feita uma comparação e uma analogia entre eles.

E por demonstrar que em certos casos a luz pode apresentar um comportamento corpuscular, pode servir de introdução para o tema da dualidade onda-partícula.

Apesar de poderem ser trabalhados de maneira individual, o ideal é que estes experimentos pudessem ser trabalhados todos em conjunto e na sequência apresentada. Porém, como nem sempre estes temas são abordados em períodos próximos, o que torna difícil o trabalho em conjunto, e demandarem um certo tempo, que muitas vezes não é disponibilizado, e alguns ainda apresentarem uma física um pouco mais complexa, uma sugestão é que estes experimentos em conjunto, possam ser trabalhados talvez em turmas de física aplicada, oficinas de física ou para grupos de alunos que apresentam mais interesse pelo assunto, como uma atividade extra.

3 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo fazer uma analogia entre a natureza do som e da luz, realizando experimentos possíveis de mostrar o comportamento ondulatório de ambos, além de fazer uma analogia entre o funcionamento da levitação acústica e levitação óptica, visando que estas ferramentas (analogia e experimento) podem ser muito benéficas para o aprendizado.

No experimento da interferência sonora foi possível visualizar a formação de um padrão de interferência (característico de ondas), originado pela interação de duas ondas sonoras distintas. Além disso, foi calculada a distância entre o máximo de intensidade central até o primeiro máximo de intensidade lateral, comparando o resultado teórico com o obtido pelo experimento, chegando em uma aproximação satisfatória. Com isso, conhecendo os fenômenos ondulatórios, acredito que foi possível demonstrar o comportamento ondulatório do som.

No experimento da interferência luminosa, fazendo um experimento análogo ao anterior, também foi possível visualizar a formação de um padrão de interferência e chegar em uma aproximação satisfatória na comparação do resultado teórico e do obtido pelo experimento, da distância entre o máximo de intensidade central até o primeiro máximo de intensidade lateral. Dessa forma, fazendo uma analogia com o som, foi possível observar o comportamento ondulatório da luz.

No experimento da levitação acústica, podemos entender o princípio de seu funcionamento, levantar alguns objetos e observar a formação de uma onda sonora estacionária, além de calcular a pressão e a força geradas pelo levitador.

No experimento da levitação aerodinâmica, podemos ver e entender como um fluxo de ar consegue suspender objetos, calcular e medir a velocidade do fluxo para que isto seja possível e entender como o efeito Coanda age sobre os objetos.

Na levitação óptica de cargas elétricas, onde cargas elétricas são levitadas por ondas eletromagnéticas estacionárias, foi possível fazer uma analogia com a levitação acústica, mostrando que som e luz possuem propriedades semelhantes.

Na levitação óptica de dielétricos, onde partículas dielétricas são aprisionadas por feixes de luz, foi possível fazer uma analogia com o experimento da levitação aerodinâmica, mostrando que a luz também possui uma natureza corpuscular.

Eu realizei todos estes experimentos sozinho, em casa e com recursos limitados. Contudo, acredito que atendam bem a proposta do trabalho, permitindo fazer analogias e comparações, obtendo resultados satisfatórios, através de experimentos relativamente simples e acessíveis.

De maneira geral, foi possível mostrar de maneira clara e didática o comportamento ondulatório do som e da luz, aproximar as pessoas de tecnologias promissoras para diversas áreas e avanços científicos, e fazer analogias interessantes.

Este trabalho contém diversas ideias e experimentos que conversam bem entre si, mas que também podem ser usados de forma independente e de acordo com a necessidade de cada docente, podendo ser aplicados em diferentes momentos e ocasiões durante o estudo de física.

Como sugestão de continuidade, este trabalho pode servir de introdução para o assunto da dualidade onda-partícula e abordagem do experimento da dupla fenda quântica, onde é observado o comportamento dual da luz e das partículas elementares, conforme proposto por Louis de Broglie (1892-1987), e a ação do "observador" neste fenômeno.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Marco Aurélio Brizzotti; PÉREZ, Nicolás; ADAMOWSKI, Julio Cezar. Levitação acústica. **Revista Brasileira de Ensino de Física [online]**, v. 37, n. 2, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/3bLSVGd6kQzpNcVWWNBznbB/?lang=pt#>. Acesso em: 9 abr. 2022.

BONJORNO, José Roberto *et al.* **Física: História & Cotidiano**. 2 ed. FTD, v. único. 672 p. (Delta).

ENTENDENDO a pressão de radiação. Carlos Eduardo. Físicadu (17min.). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=b7LGxJgdCA0>. Acesso em: 9 abr. 2022.

FASE (física). Wikipédia. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Fase_\(f%C3%ADsica\)#/media/](https://pt.wikipedia.org/wiki/Fase_(f%C3%ADsica)#/media/). Acesso em: 8 abr. 2022.

HELERBROCK, Rafael. **Efeito fotoelétrico**. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/o-efeito-fotoeletrico.htm>. Acesso em: 9 abr. 2022.

HELERBROCK, Rafael. **O que é onda?**. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-onda.htm>. Acesso em: 9 abr. 2022.

HELERBROCK, Rafael. **Reflexão da luz**. Mundo Educação. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/reflexao-luz.htm>. Acesso em: 8 abr. 2022.

KOEBLER, Roland. **Optical tweezers**. Wikipédia. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_tweezers. Acesso em: 9 abr. 2022.

LIRA, Júlio César Lima. **Leis da Reflexão**. Info Escola. Disponível em: <https://www.infoescola.com/fisica/leis-da-reflexao/>. Acesso em: 8 abr. 2022.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. **Maxwell's Equations and Electromagnetic Waves**. Massachusetts Institute of Technology. Disponível em: <https://web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations/coursenotes/modules/guide13.pdf>. Acesso em: 9 abr. 2022.

MOURA, Breno Arsioi; BOSS, Sergio Luiz Bragatto. Thomas Young e o resgate da teoria ondulatória da luz: Uma tradução comentada de sua Teoria Sobre Luz e Cores. **Revista Brasileira de Ensino de Física [online]**, v. 37, n. 4, 2015.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/JsXrK5PpkQBTnBjfN5GJn4L/?lang=pt#>. Acesso em: 9 abr. 2022.

OLIVEIRA, Ebenezer Fernandes. **TÓPICOS DE ENSINO DE FÍSICA I**. Instituto de Física "Gleb Wataghin". Disponível em: https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2009/EbeneserO_Landers.pdf. Acesso em: 9 abr. 2022.

OLIVEIRA, Gabriela de. **Ondas periódicas**. Brasil escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/ondas-periodicas.htm>. Acesso em: 7 abr. 2022.

OLIVEIRA, Rilavia Almeida de; MARTINS, André Ferrer Pinto; SILVA, Ana Paula Bispo da. Thomas Young e a teoria ondulatória da luz no início do século XIX: aspectos conceituais e epistemológicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física [online]**, v. 41, n. 2, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/jBzKXJkgYvTqYRRwcSZ69sr/?lang=pt#>. Acesso em: 9 abr. 2022.

ONDAS: Tubos sonoros. Rafael Irigoyen. Pura Física (16min.). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=MXqOE92rsis>. Acesso em: 9 abr. 2022.

ONDAS e sinais. Disponível em: https://irp-cdn.multiscreensite.com/89a70595/files/uploaded/Sinais%20e%20ondas.%20Ondas%20transversais%20e%20ondas%20longitudinais.%20ondas%20mec%C3%A2nicas%20e%20ondas%20eletromagn%C3%A9ticas_final.pdf. Acesso em: 7 abr. 2022.

ONDA Estacionária. Museu das comunicações. Disponível em: http://www.cmm.gov.mo/por/Exhibition/secondfloor/moreinfo/2_11_0_StandingWave.html. Acesso em: 9 abr. 2022.

OPTICAL Tweezers and the 2018 Nobel Prize in Physics. Brady Haran. Sixty Symbols, 2018 (12min.). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=XjXLJMUrNBo>. Acesso em: 13 abr. 2022.

PINÇAS ópticas. Stringfixer. Disponível em: https://stringfixer.com/pt/Optical_tweezers. Acesso em: 9 abr. 2022.

RAMOS, Tiago dos Santos. **Força de radiação acústica produzida por ondas estacionárias de ultrassom**. São Paulo, 2017. 125 p Tese (Ciências) - Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-06122017-085952/publico/TiagodossantosRamosCorr17.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2022.

REGRA De Direito, Campo Magnético, Força De Lorentz. Grátispng. Disponível em: <https://www.gratispng.com/png-wk1ic3/>. Acesso em: 9 abr. 2022.

RODRIGUES, Luiz Guilherme Rezende. **Interferência entre ondas**. Info Escola. Disponível em: <https://www.infoescola.com/fisica/interferencia-entre-ondas/>. Acesso em: 8 abr. 2022.

SCHNEIDER, Álisson. **Força de Arrasto**. Acervo Museológico dos Laboratórios de Ensino de Física. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/amlef/glossario/forca-de-arrasto/>. Acesso em: 13 abr. 2022.

SILVA, Domiciano Correa Marques da. **Refração de ondas**. Mundo Educação. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/refracao-ondas.htm>. Acesso em: 8 abr. 2022.

SILVA JÚNIOR, Joab Silas da. **Cinco coisas que você precisa saber sobre Ondas**. Mundo Educação. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/cinco-coisas-que-voce-precisa-saber-sobre-ondas.htm>. Acesso em: 8 abr. 2022.

SILVA JÚNIOR, Joab Silas da. **O que é difração?**. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-difracao.htm>. Acesso em: 8 abr. 2022.

SOM . Wikipédia. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Som>. Acesso em: 8 abr. 2022.

TUNGSTEN, Yuri. **Espectro eletromagnético**. Wikipédia. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrum_pt_2.svg. Acesso em: 9 abr. 2022.

TÓPICOS Avançados em Física: Levitação de objetos com ondas sonoras. Marco Aurélio Brizzotti Andrade. UNIVESP, 2018 (12min.). Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=ftq2XSX_KA4. Acesso em: 9 abr. 2022.

UFMG. **Interferência**. Sala de Demonstrações de Física. Disponível em: <http://demonstracoes.fisica.ufmg.br/artigos/ver/94/13.-Interferencia>. Acesso em: 9 abr. 2022.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **dB, Pressão, Potência e Intensidade**. USP e disciplinas. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4437605/mod_resource/content/0/04%20-%20dB%20Press%C3%A3o%20Pot%C3%Aancia%20Intensidade.pdf. Acesso em: 9 abr. 2022.

UNIVERSITY OF COLORADO BOULDER. **Interferência de onda**. PHET. Disponível em: https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_pt_BR.html. Acesso em: 9 abr. 2022.

USP. **Interferência e Difração**. Departamento de Física-Matemática Instituto de Física da USP. 46 p. Disponível em: http://fma.if.usp.br/~mlima/teaching/4320293_2012/Cap3.pdf. Acesso em: 9 abr. 2022.

WAGNER, Sérgio. **ONDAS E O ENEM**. Mister M da física. Disponível em: <http://mistermdafisica.blogspot.com/2012/10/ondas-e-o-enem.html>. Acesso em: 9 abr. 2022.

WELTNER, Klaus et al. A dinâmica dos fluidos complementada e a sustentação da asa. **Revista Brasileira de Ensino de Física [online]**, v. 23, n. 4, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/FCv7M5JNVv6yVJjSr3CPKtS/?lang=pt#>. Acesso em: 9 abr. 2022.

YOUNG, Thomas. Outlines of Experiments and Inquiries Respecting Sound and Light. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, p. 125-130, 1800.

APÊNDICE A — Visita ao INMETRO

Durante a execução deste trabalho, a convite do pesquisador Paulo Massarani, eu tive a oportunidade de, junto com meu orientador, fazer uma visita à divisão de metrologia acústica e vibrações (DIAVI) do INMETRO, localizada em Xerém - RJ, para conhecer um pouco do trabalho realizado por eles, conhecer as câmaras acústicas e poder me aprofundar mais sobre o assunto. Além disso, pude tirar algumas dúvidas sobre os cálculos de pressão acústica que constam no trabalho e ainda tive a oportunidade de fazer uma breve demonstração do levitador acústico, montado por mim, para a equipe de acústica do instituto.

Figura A1 — O autor diante do prédio da divisão de metrologia acústica e vibrações (DIAVI).



Figura A2 — Câmara anecoica (ao lado de Paulo Massarani).



Figura A3 — Câmara difusa ou reverberante (ao lado de Zemar).



Figura A4 — Demonstração do levitador acústico para a equipe da divisão de acústica.

