



Universidade Estadual de Campinas
Instituto de Física Gleb Wataghin
IFGW - Unicamp

RELATÓRIO PARCIAL

F709 - Tópicos do Ensino da Física II 2ºSem/2019

**Felipe Pedroso Mack
RA:081335**

Campinas/SP, 11 de outubro de 2019

1 Introdução

A Ondulatória é a área da Física dedicada ao estudo das ondas, sejam elas mecânicas, eletromagnéticas ou de matéria. Essa é uma das 5 grandes áreas abordadas no Ensino Regular, ao lado da Mecânica, do Eletromagnetismo (fragmentado em *Eletricidade* e *Magnetismo*), da Termodinâmica (mais tratada por *Termologia*) e da Óptica Geométrica.

A Acústica, por sua vez, encontra-se inserida dentro da Ondulatória, também trabalhada (mesmo que de forma básica) no Ensino Médio. Essa subárea se dedica ao estudo particular das ondas sonoras, das particularidades dos fenômenos ondulatórios associados ao som (como, por exemplo, o *eco*, a *ressonância sonora* e o *Efeito Doppler*) e das fontes sonoras (como, por exemplo, as *cordas vibrantes* e os *tubos sonoros*).

O foco deste relatório será o estudo dos *Tubos Sonoros Fechados* e da discussão a cerca de como desenvolver esse tema em sala de aula, de maneira teórica e prática, esta a partir da montagem do experimento-tema deste trabalho: o **Tubo de Kundt**.

A partir da montagem do experimento e da construção da teórica que o envolve, será possível discutir meios de trazer a Acústica para a sala de aula do Ensino Médio, vencendo a abstração que a cerca podendo, também, despertar o interesse nessa área repleta de aplicações práticas.

Por fim, serão discutidos outros meios de se trabalhar a Acústica de maneira lúdica de modo tanto a despertar o possível interesse dos alunos na Física como um todo quanto como estratégia diferencial no ensino da física, em contraponto ao tradicionalismo que, muitas vezes, torna o conteúdo inacessível e desinteressante.

2 Contextualização Histórica e Apresentação da Montagem

O *Tubo de Kundt* é uma montagem experimental desenvolvida no século XIX pelo físico Alemão August Adolf Eduard Eberhard Kundt (1839 - 1894) para elucidar a formação dos harmônicos sonoros em um tubo fechado. Kundt, que inicialmente mostrou interesse pela *astronomia* voltou seus interesses para a *física* influenciado pelo cientista experimental alemão Heinrich Gustav Magnus (1802 - 1870) conhecido, dentre outras razões, por suas pesquisas a respeito dos desvios em trajetórias balísticas, fenômeno hoje conhecido como *Efeito Magnus*.

Em 1866, Kundt desenvolveu a montagem hoje conhecida como *Tubo de Kundt* para medir a velocidade do som nos gases. Kundt utilizou um tubo de vidro com uma pequena quantidade de cortiça. Utilizando um arco de violino em um pedaço de couro recoberto por resina, Kundt provocou ondas sonoras dentro do tubo e, com variações de comprimento impostas por um pistão, buscou as condições de ressonância (hoje chamados de *harmônicos*). Nessas condições

de ressonância, a cortiça se organizava em pequenos montes nas regiões dos nodos formados pelas ondas estacionárias dentro do tubo.

Sabe-se, porém, que dois nodos delimitam uma semionda, o que possibilita a determinação do comprimento de onda e a posterior determinação da velocidade de propagação da onda, possível tendo-se o comprimento de onda determinado e a frequência da onda, conhecida. A partir dessa análise, foi possível calcular a velocidade da propagação da onda sonora dentro do tubo.

A reprodução dessa montagem experimental é bastante comum em laboratórios de ensino de Ciências sofrendo, porém, alterações em virtude dos novos recursos. O uso de falantes e geradores de frequência, por exemplo, faz com que a busca pelos harmônicos no tubo aconteça em virtude da regulagem eletrônica da frequência emitida, não fazendo-se necessária a regulagem do comprimento do tubo. A imagem a seguir indica uma montagem moderna do Tubo de Kundt.



Figura 1: Montagem moderna para o Tubo de Kundt utilizada em atividades realizadas durante um mestrado profissional na Universidade Federal Rural de Pernambuco. Ref [3].

Podemos notar, a partir da imagem, que essa montagem conta com um gerador de frequência (celular), um amplificador ligado a um auto-falante e um tubo de acrílico de comprimento regulável (por meio de um pistão). Embora eficiente, essa montagem distoa da montagem original não só pelos materiais utilizados como, também, pela utilização dos recursos eletrônicos.

3 Formulação Teórica

3.1 Tubos Sonoros Fechados

A medição da velocidade do som utilizando-se o Tubo de Kundt faz-se possível em virtude do estudo matemático das ondas estacionárias. Consideraremos o Tubo de Kundt como um *tubo sonoro fechado* para a representação das ondas estacionárias.

Emitindo-se uma onda (no caso, sonora) no tubo, ela irá refletir na parede do tubo. Caso a emissão seja constante, teremos pontos fixos de interferência construtiva e de interferência destrutiva. As posições de interferência construtiva serão chamadas de *ventres*, enquanto as de interferência destrutiva, de *nodos* (ou, em alguns livros didáticos, *nós*).

O primeiro estado de ressonância ocorre com a formação de *1 nodo* e *1 ventre*, criando um padrão correspondente a *um quarto de onda*, como na figura a seguir.

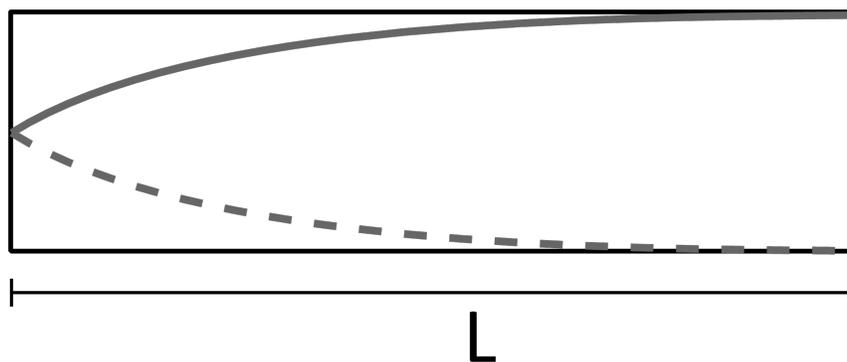


Figura 2: Formação do 1º estado de ressonância em um tubo sonoro fechado, de comprimento L .

A esse estado de ressonância damos o nome de *1º Harmônico* ou de *Harmônico Fundamental*. Formado um padrão de um quarto de onda nesse tubo, podemos escrever

$$L = \frac{\lambda}{4}$$

A *Equação Fundamental da Ondulatória*, por outro lado, nos diz que, para uma velocidade de propagação v da onda e com frequência f , temos a relação

$$v = \lambda \cdot f \quad (1)$$

em que λ é o comprimento de onda dessa onda.

Para o *Harmônico Fundamental*, então, podemos escrever:

$$f_1 = \frac{v}{4L} \quad (2)$$

em que f_1 é a frequência de vibração da onda sonora nesse estado.

O segundo estado de ressonância decorre do acréscimo de um nodo no padrão formado dentro do tubo, como na figura a seguir.

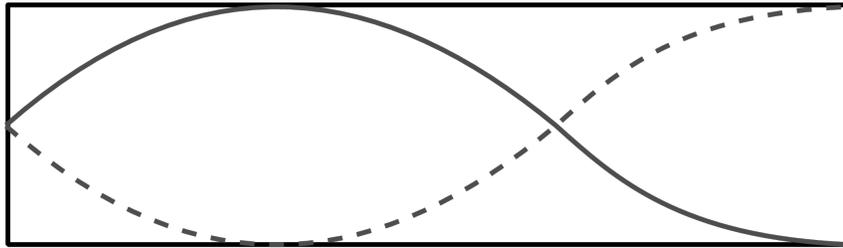


Figura 3: 2ª forma de ressonância formada nos tubos fechados.

Devemos notar que, neste caso, temos um padrão de *três quartos* de onda, o que nos leva a escrever:

$$L = \frac{3\lambda}{4}$$

que nos dá, a partir da Eq. (1), uma frequência f' dada por:

$$f' = \frac{3v}{4L} \quad (3)$$

É importante notarmos que $f' = 3f_1$, de modo que podemos escrever $f' = f_3$. Esse estado será chamado, então, de *3º Harmônico*. Vale o destaque de que, nos tubos sonoros fechados o *2º Harmônico*, de frequência $f_2 = 2f_1$ não se forma.

De maneira análoga, o próximo estado de vibração contará com a formação de mais um nodo, o que nos dará um padrão de *cinco quartos* de onda e uma frequência correspondente, f'' , dada por

$$f'' = \frac{5v}{4L}$$

ou seja, tal que $f'' = 5f_1$. Esse estado será conhecido, portanto, como *5º Harmônico* e terá frequência $f'' = f_5 = 5f_1$. É possível, por fim, generalizarmos a frequência do *n-ésimo* Harmônico formado no tubo sonoro pela expressão

$$f_n = \frac{nv}{4L}, \text{ para } n = 1, 3, 5, \dots \quad (4)$$

o que nos dá, finalmente, uma expressão para a velocidade do som no tubo com a formação do *n-ésimo* Harmônico:

$$v = \frac{f_n \cdot 4L}{n}, \text{ para } n = 1, 3, 5, \dots \quad (5)$$

3.2 Determinação de v a partir do Tubo de Kundt

Suponhamos que, com a geração de uma onda sonora dentro de um Tubo de Kundt contendo pó de cortiça sejam formados k agrupamentos ("montes") de cortiça, como na figura a seguir:

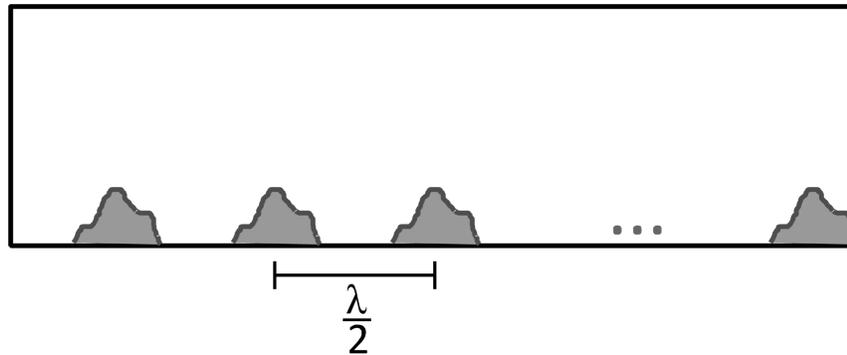


Figura 4: Agrupamentos de cortiça em um tubo de Kundt a partir da geração de uma onda de frequência f conhecida.

Os agrupamentos de cortiça ocorrerão nos nodos formados pela onda estacionária, de modo que a distância entre eles seja igual a $\frac{\lambda}{2}$, em que λ é o comprimento de onda associado à onda gerada nesse tubo.

Analisando os harmônicos construídos na subseção anterior, podemos notar que um padrão de ressonância contendo n nodos corresponde ao $(2n - 1)$ -ésimo harmônico, de modo que para k agrupamentos, temos o $(2k - 1)$ -ésimo harmônico formado no tubo. Sendo assim, a velocidade de propagação do som nesse tubo, a partir da Eq. (5), é:

$$v = \frac{f_{2k-1} \cdot 4L}{2k - 1} \quad (6)$$

de modo que, conhecidos os valores de f_{2k-1} (frequência da fonte geradora da onda sonora), k (número de agrupamentos) e L (comprimento do tubo), é possível calcularmos a velocidade v do som nesse tubo.

Como exemplo, imaginamos um tubo de Kundt no qual fez-se vibrar uma onda sonora correspondente à nota $Lá$, de frequência $f = 440\text{Hz}$. Suponhamos que ajustando lentamente o comprimento do tubo, quando este for de 58 cm tenhamos dois agrupamentos ("montes") de cortiça, ou seja, $k = 2$.

A partir da Eq. (6), temos:

$$v = \frac{f_{2k-1} \cdot 4L}{2k - 1} = \frac{440 \cdot 4 \cdot 0,58}{(2 \cdot 2 - 1)} \approx 340,26 \text{ m/s}$$

Referências

- [1] KUNDT, A. *Acoustic Experiments*. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. Vol. 35 no. 4. UK: Taylor Francis. pp. 41–48. Retrieved 2009-06-25
- [2] HALLIDAY, D.; RESNICK, R. J. *Fundamentos de Física Volume 2*, 9ª Edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2012.
- [3] NETO, Airton S. M., JÚNIOR, Francisco N. M. *O tubo de Kundt: o ensino de Acústica e sua relação com a música em atividades experimentais no contexto da aprendizagem significativa*. Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE/PE.
- [4] Kundt's Tube, *Wikipedia, The Free Encyclopedia*.
https://en.wikipedia.org/wiki/Kundt%27s_tube
- [5] Heinrich Gustav Magnus, *Wikipedia, The Free Encyclopedia*.
https://pt.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Gustav_Magnus
- [6] August Kundt, *Wikipedia, The Free Encyclopedia*.
https://en.wikipedia.org/wiki/August_Kundt