
CUBA DE ONDAS

Relatório

F 609A – Tópicos de ensino de física I

Autor:

Renata Possobon RA 147804
re.possobon @ gmail.com



Orientador:

Prof. Dr. Thiago Alegre
alegre @ ifi.unicamp.br
Departamento de Física Aplicada

Coordenador:

Prof. Dr. José J. Lunazzi
lunazzi @ ifi.unicamp.br
Departamento de Física da Matéria Condensada

Campinas
06 de julho de 2016

RESUMO

Este projeto consiste na construção de uma cuba de ondas para ser utilizada na demonstração de alguns fenômenos ondulatórios em sala de aula, a fim de contribuir para o processo de ensino e aprendizagem em física. Utilizando a cuba construída, foram exploradas as características gerais das ondas em água e os fenômenos de reflexão, focalização, difração e interferência de ondas.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o ensino de física na maioria das escolas brasileiras é voltado para a reprodução de teorias e resolução de exercícios, deixando de lado processos de observação, abstração, identificação, pesquisa e experimentação. Tendo em vista que a cultura científica de cada pessoa é construída ao longo da vida, de acordo com suas experiências e interpretações do processo de construção do conhecimento científico, é evidente a necessidade de implementar atividades que proporcionem ao aluno oportunidades de observar fenômenos e discutir sobre eles, a fim de contribuir para o aprimoramento e ampliação de sua cultura científica.

Na explicação de fenômenos ondulatórios, por exemplo, a discussão de efeitos como reflexão e difração é um obstáculo, uma vez que os professores não possuem ferramentas para exemplificação visual do conteúdo, deixando os alunos sem subsídio para a interpretação dos modelos e teorias que lhes são apresentados. Neste trabalho, propõe-se a construção de uma cuba de ondas para ser utilizada como instrumento de demonstração de fenômenos ondulatórios, a fim de contribuir no processo de ensino e aprendizagem em física.

2. OBJETIVO

Objetiva-se construir uma cuba de ondas, utilizando materiais simples, e realizar uma breve apresentação de suas aplicações na demonstração dos fenômenos de reflexão, focalização, difração e interferência.

3. ORIGINALIDADE

Este tipo de projeto já foi desenvolvido por outros alunos do Prof. Dr. José J. Lunazzi e é possível ter acesso aos relatórios através dos links contidos nas referências [1], [2] e [3], e também foi abordado na monografia de Martins [4], porém com uma abordagem diferente em relação aos parâmetros de construção da cuba.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A cuba de ondas é formada por três elementos principais: A cuba, que consiste em um recipiente onde será introduzido o líquido, o oscilador, que será responsável por gerar as ondas no líquido e um retroprojeto, que permitirá uma melhor visualização das ondas formadas no líquido. A Figura 1 ilustra a disposição desses elementos para o funcionamento adequado do experimento: o oscilador é acoplado a uma das extremidades da cuba, e esta é colocada sobre o retroprojeto para que as ondas possam ser projetadas, o que implica a necessidade da cuba ser produzida com fundo transparente.

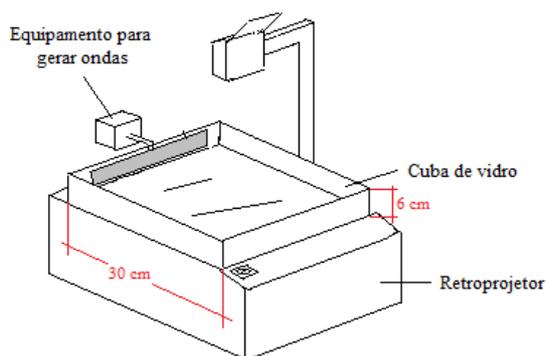


Figura 1 – Disposição dos elementos principais do projeto da cuba de ondas: cuba, oscilador e retroprojeto.

Além destes elementos, são necessários alguns acessórios que auxiliam na demonstração dos fenômenos ondulatórios: uma barreira plana para a demonstração de reflexão, uma barreira curva para a demonstração de focalização, barreiras com uma ou duas fendas e um pequeno objeto sólido para a demonstração de difração e, por fim, uma placa de vidro triangular, utilizada para diminuir a profundidade da água na cuba a fim de observar diferenças na velocidade de acordo com a profundidade da água. A seguir, são descritos os materiais utilizados e os processos envolvidos na produção de cada elemento do projeto.

4.1 Cuba

Para a montagem da cuba, optou-se por utilizar dimensões que se adequassem às dimensões do retroprojeto. Para tanto, utilizou-se uma placa de vidro com dimensões (30 × 30) cm e espessura de 4mm como fundo e quatro placas de vidro com dimensões (6 × 30) cm e espessura de 4mm como laterais. Utilizando cola silicone para vedação, as placas foram coladas de maneira a formar uma caixa. Após finalizar este procedimento, obteve-se o resultado ilustrado na Figura 2.



Figura 2 – Cuba de vidro.

4.2 Oscilador

Foram construídos dois osciladores distintos para o projeto, que serão denotados por oscilador 1 e oscilador 2. O oscilador 1 utiliza o movimento de rotação excêntrica de uma pequena esfera acoplada a motor como fonte de vibração. A Figura 3 ilustra o esquema geral deste oscilador. Para sua confecção foram utilizados os seguintes materiais: uma haste de aço de (50 × 4) cm, retalhos de vasilhames plásticos, duas barras roscadas de aproximadamente 60 cm, duas latas de alumínio, quatro porcas, quatro arruelas, parafusos diversos, 3 conectores metálicos, cliques de papel, três pequenas esferas de plástico, um motor que foi retirado de uma impressora, um potenciômetro e uma fonte de 5V.

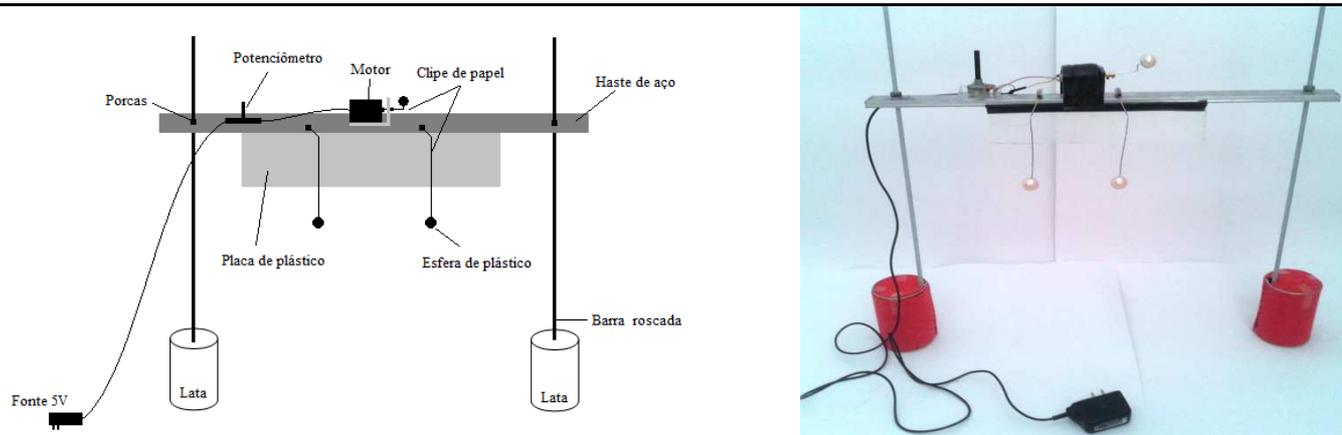


Figura 3 – Esquema geral do oscilador 1, à esquerda, e o oscilador após sua montagem completa, à direita.

A haste de aço foi perfurada nas laterais, a 3 cm da extremidade, com furos do mesmo diâmetro da barra roscada. Dos retalhos de plástico, foram recortadas placas com dimensões de (23 × 5) cm, (4 × 4) cm e (4 × 2) cm. A maior placa foi fixada embaixo da haste, a distâncias iguais das extremidades, formando um “T”, e as placas menores na parte superior da haste, no centro, formando entre si um “L”, onde o motor foi fixado com o eixo passando por um furo feito na placa fixada perpendicularmente à haste. Utilizando um conector, um pedaço de clipe de papel com uma esfera de plástico em uma das extremidades foi preso ao eixo do motor. O motor foi então ligado ao potenciômetro e este a uma fonte de 5 V. As barras roscadas foram fixadas verticalmente às latas. Estas barras serão o suporte para a haste de aço, que é fixada, pelos furos nas extremidades, utilizando as porcas e as arruelas. Outros dois conectores foram fixados na parte superior frontal da haste de aço, a distâncias iguais do centro (aproximadamente 6 cm). Estes conectores possibilitam que sejam acoplados ao sistema dois “braços”, em formato de “L”, de (10 × 8) cm, fabricados com cliques de papel, contendo uma esfera de plástico presa na extremidade.

Ajustando a altura de fixação da haste para que a parte plástica que está fixada embaixo da haste encoste-se à água contida na cuba, quando o motor é ligado, a vibração causada pelo giro da esfera de plástico fixada no eixo do motor faz com que a placa plástica produza ondas retas na água. Subindo a haste até que a placa plástica não encoste mais na água contida na cuba e fixando os braços produzidos com o clipe de papel, quando o motor é ligado, a vibração produz ondas circulares na água.

O oscilador 2 utiliza a vibração de um alto falante para produzir as ondas na água. A Figura 4 ilustra o esquema geral deste oscilador.

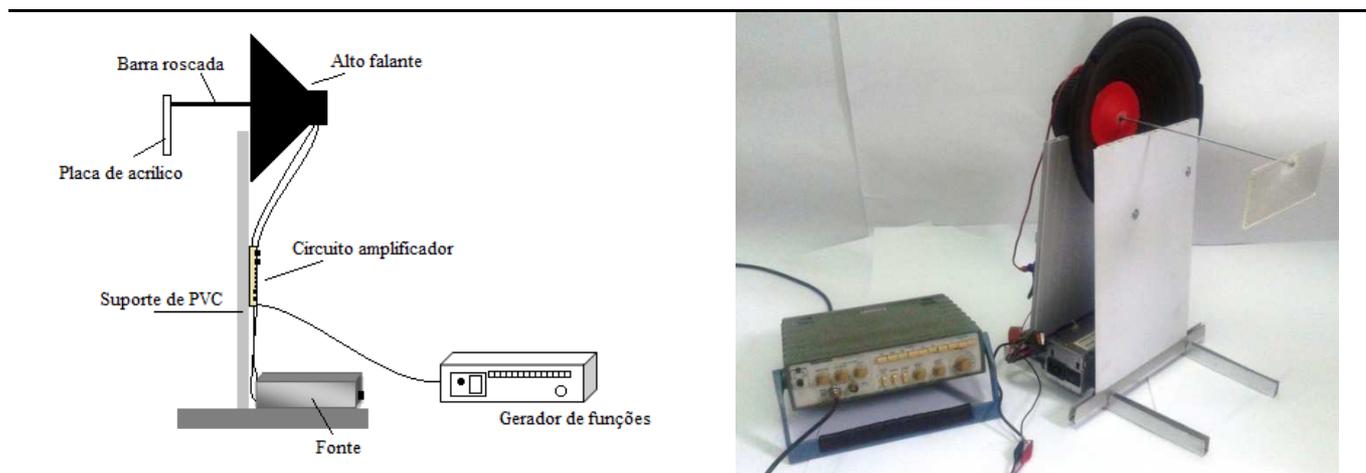


Figura 4 - Esquema geral do oscilador 2, à esquerda, e o oscilador após sua montagem completa, à direita.

No centro do alto falante foi colada uma placa de plástico que possui uma barra roscada fixada no seu centro. Na outra extremidade da barra, foi fixada uma placa de acrílico de (15×7) cm, que será utilizada para a produção de ondas retas na água. O suporte do alto falante foi produzido com duas placas de PVC, de dimensões (38×22) cm, alguns pedaços de cantoneira de alumínio e parafusos.

As vibrações são produzidas no alto falante utilizando um gerador de funções utilizando funções senoidais ou quadradas, uma vez que se deseja controlar a frequência de oscilação da onda produzida, mas também é possível produzir a oscilação utilizando áudios de qualquer dispositivo eletrônico (celular ou computador, por exemplo). O auto falante foi conectado a um circuito amplificador, ao gerador de funções e uma fonte de alimentação de 12V e 4A. O circuito amplificador, ilustrado na Figura 5, foi confeccionado utilizando um circuito integrado TDA2004R, capacitores e resistores, cujos valores nominais e função no circuito estão indicados na Tabela 1.

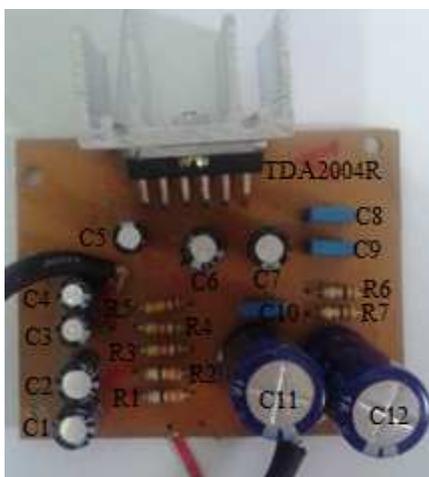


Figura 5 – Circuito amplificador de potência utilizado para possibilitar as oscilações desejadas no alto falante.

Tabela 1 – Valor nominal dos componentes utilizados no circuito amplificador da Figura 5 e principal função de cada componente.

Componente	Valor nominal	Função
R ₁ , R ₂	33Ω	Ajuste de ganho de malha fechada
R ₃ , R ₄	1,2kΩ	
R ₅	120kΩ	Otimização da simetria do sinal de saída
R ₆ , R ₇	1Ω	Estabilidade de frequência
C ₁ , C ₂	220μF	Desacoplamento DC da entrada
C ₃ , C ₄	2,2μF	Realimentação de entrada e desacoplamento DC
C ₅	10μF	Rejeição de <i>ripple</i>
C ₆ , C ₇	100μF	<i>Bootstrapping</i>
C ₈ , C ₉ , C ₁₀	1μF	Estabilidade de frequência
C ₁₁ , C ₁₂	2200μF	Desacoplamento DC da saída

Comparando os dois osciladores, algumas vantagens e desvantagens ficam claras: o oscilador 1 é mais compacto e os materiais utilizados em sua confecção podem ser facilmente adquiridos, e, em um primeiro momento, devido às dimensões dos materiais que foram utilizados no oscilador 2, o oscilador 1 pode produzir dois tipos de onda enquanto o oscilador 2, apenas um. Porém, utilizando o oscilador 2, é possível explorar as diferentes frequências de ondas.

4.3 Uso do retroprojektor

O retroprojektor é utilizado para proporcionar uma melhor visualização das ondas produzidas na cuba, possibilitando que um grande público possa acompanhar o experimento. Na imagem formada pelo retroprojektor, visualiza-se as ondas como regiões claras e escuras. Acredita-se que as regiões claras representam tanto as cristas quanto os vales das ondas formadas na cuba e as partes escuras representam as partes inclinadas das ondas. Percebe-se também uma diferença de intensidade entre elas: as cristas são ligeiramente mais claras do que os vales.

Essa interpretação dada às imagens formadas pelo retroprojektor foi ressaltada pelo Prof. Dr. Lunazzi, pois, segundo ele, a luz das imagens de luz convergente e divergente criadas seria focalizada na projeção na tela, e somente a luz refratada em ângulo não iria atingir a tela, como ilustrado na Figura 6. Ele ainda observou que para comprovar estas afirmações seria necessário medir a frequência da onda e sua velocidade utilizando um vídeo ou sequência, medindo pelos quadros a frequência da palheta que cria a onda, observando o momento em que repete uma posição extrema, e a velocidade observando o quanto um elemento (claro ou escuro) da onda avançou em um intervalo de tempo. Segundo a interpretação do Prof. Dr. Lunazzi, o que vemos nas imagens é uma onda com o dobro da frequência verdadeira, ao contrário do indicado na bibliografia. Infelizmente, não foi possível comprovar estas observações devido a uma série de adversidades que surgiram durante o semestre.

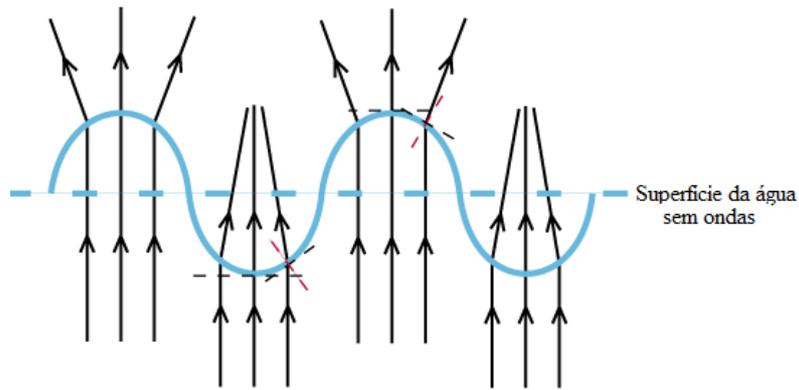


Figura 6 – Ilustração da observação feita pelo Prof. Dr. Lunazzi a respeito das imagens formadas pelo retroprojektor.

4.4 Acessórios

Além dos elementos acima descritos, algumas demonstrações que podem ser realizadas na cuba de ondas necessitam dos acessórios (a), (b), (c) e (d) ilustrados na Figura 7.

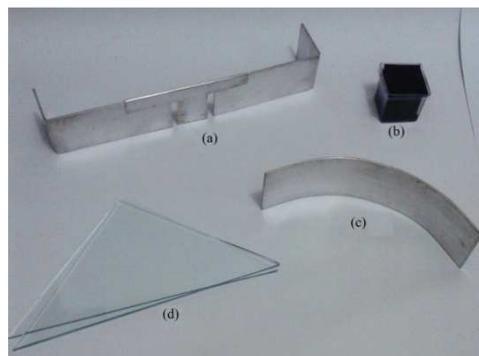


Figura 7 – Acessórios confeccionados para serem utilizados nas demonstrações realizadas na cuba de ondas.

O acessório (a) consiste em três peças de alumínio, duas com formato de “L” e uma com formato de “T” e contendo uma dobra na parte superior, de maneira que as outras duas partes podem ser conectadas ou desconectadas, possibilitando que a mesma peça forme um obstáculo reto, um obstáculo com uma fenda e um obstáculo com duas fendas, podendo, portanto, ser utilizada em demonstrações de reflexão e difração. O acessório (b) é uma pequena caixa de acrílico revestida com EVA e com chumbos de pesca no interior (apenas para dar peso) e pode ser utilizada como obstáculo em demonstrações de difração. O acessório (c) é uma peça de alumínio que foi encurvada a fim de ser utilizada na demonstração de focalização. Por fim, o acessório (c) consiste em dois triângulos isósceles de vidro com 16 cm de lado, que serão utilizados para diminuir a profundidade da cuba na demonstração da relação entre velocidade das ondas e profundidade da água na cuba.

5. APLICAÇÕES

Com os materiais produzidos neste projeto, pode-se demonstrar uma série de fenômenos ondulatórios como reflexão, refração e interferência, por exemplo. A seguir, são apresentadas possíveis aplicações para a cuba de ondas, juntamente com a teoria ondulatória envolvida em cada uma das demonstrações.

5.1 Características das ondas

O movimento ondulatório está muito presente no cotidiano de todas as pessoas e é um fenômeno que aparece em muitos contextos em diversas áreas da física. Porém, o conceito de onda é abstrato. Em um sentido bastante amplo, uma onda é qualquer sinal que transmite energia de um ponto a outro de um meio, com velocidade definida, sem que haja transporte direto de matéria. ^[1] Essa definição é geral, porém, as ondas são classificadas conforme sua natureza, direção de propagação e direção de vibração.

De acordo com sua natureza as ondas podem ser classificadas, basicamente, em ondas mecânicas, eletromagnéticas e ondas de matéria. As ondas mecânicas são governadas pelas leis de Newton e existem apenas em um meio material, como ar, água e sólidos, enquanto as ondas eletromagnéticas, não precisam de um meio material para se propagar, e as ondas de matéria, são ondas que estão associadas a partículas elementares.

Segundo a direção de propagação, as ondas são classificadas em unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais, se estas se propagam em uma, duas ou três dimensões, respectivamente. A Figura 8 ilustra alguns exemplos desses tipos de onda.

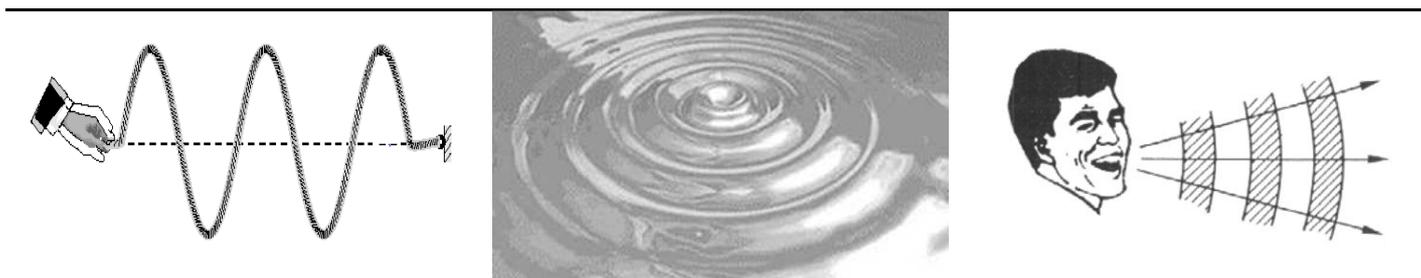


Figura 8 – Exemplos de ondas unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. A oscilação ilustrada na primeira imagem gera, na corda uma onda que se propaga em uma única direção, enquanto oscilações em água na segunda imagem ilustram ondas que propagando em duas direções e, na terceira imagem, ilustra-se as ondas sonoras, que se propagam em todas as direções. Fontes: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/frente-onda-raio-onda.htm>>, <<http://slideplayer.com.br/slide/390020/>>.

Por fim, quanto à direção de vibração, as ondas podem ser classificadas como transversais, quando a direção de oscilação é perpendicular à direção de propagação da onda ou como longitudinais, quando a oscilação é paralela à propagação da onda. Ondas longitudinais e transversais são chamadas de ondas progressivas quando se propagam de um lugar a outro.

As ondas em água possuem muitas características peculiares. Primeiramente, essas ondas são transversais e longitudinais ao mesmo tempo e o movimento das gotículas de água na onda é diferente do próprio movimento da onda: no interior do líquido as gotículas possuem movimentos circulares, logo abaixo da superfície. Objetos flutuantes também acompanham este movimento circular, como ilustrado na Figura 10.

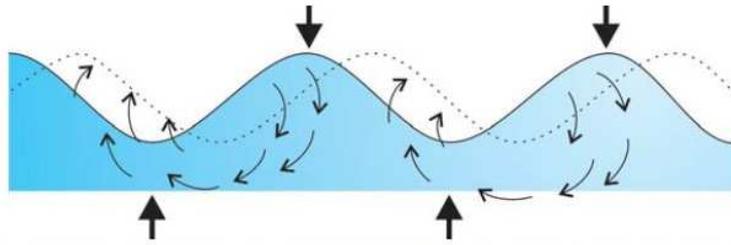


Figura 9 – Movimento efetuado pelas gotículas de água logo abaixo da superfície da onda. ^[5]

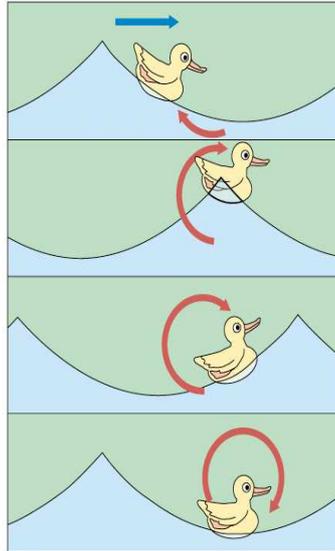


Figura 10 – Ilustração do movimento de um objeto flutuante colocado sobre a onda produzida.

As ondas em água são bidimensionais e dois tipos específicos podem ser explorados em cubas de ondas: ondas retas e ondas circulares. Ondas retas são ondas cujas frentes de onda são segmentos de reta e as ondas circulares são ondas cujas frentes de onda propagam-se circularmente na superfície da água. Para uma análise simplificada, supõe-se que a superfície com distúrbio possui oscilação harmônica simples e com amplitude constante. Assim, pode-se descrever ondas retas sobre a superfície da água como:

$$\varphi(\vec{r}, t) = \mathcal{A} \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \delta) = \text{Re}[Ae^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}] \quad (1)$$

onde

$$A = \mathcal{A}e^{i\delta} \quad (2)$$

é a amplitude complexa da onda e

$$\vec{k} = k_x \hat{i} + k_y \hat{j} \quad (3)$$

é o vetor de onda, tomando a superfície da água como o plano xy . A magnitude de \vec{k} é o número de onda $k = 2\pi/\lambda$ e sua direção é a direção de propagação da onda. O argumento do cosseno é chamado de fase de onda e as frentes de onda são definidas por $\vec{k} \cdot \vec{r} = \text{constante}$.

Como $\vec{r} = (x, y)$, $\vec{k} = (k_x, k_y)$, onde

$$k_x^2 + k_y^2 = \frac{\omega^2}{v^2} \quad (4)$$

onde ω frequência angular e v é a velocidade da onda, pode-se escrever

$$\varphi(\vec{r}, t) = \mathcal{A} \cos(k_x x + k_y y - \omega t + \delta) \quad (5)$$

Derivando duas vezes em relação a x ou a t, obtém-se, respectivamente

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -k_x^2 \varphi \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\omega^2 \varphi \quad (7)$$

Com estas considerações, da equação (4), pode-se escrever a equação de ondas para duas dimensões:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad (8)$$

Para a onda circular, a amplitude a cai com $1/\sqrt{\rho}$, onde $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ é a distância à fonte, de forma que a função de onda é dada por:

$$\varphi(\vec{r}, t) = \frac{a}{\sqrt{\rho}} \cos(k\rho - \omega t + \delta) \quad (9)$$

Porém, na realidade, as ondulações em água também não possuem uma frente de onda bem definida, pois ocorre uma dispersão de ondas devido a diferenças na velocidade de fase. Esta característica produz um fenômeno de interferência entre ondas: existe uma onda principal, grande, e ondas muito finas, que podem apresentar uma velocidade distinta da velocidade de fase da onda principal. Na cuba de ondas esse fenômeno é observado facilmente quando ondas retas são produzidas, como mostrado na Figura 11. As ondas mais finas que propagam-se com velocidade mais elevada do que a onda principal são ondas capilares, pois nelas a principal força restauradora é a ação capilar, juntamente a gravitação. ^[10]



Figura 11 - Ondas capilares formadas pela dispersão em uma onda plana.

A velocidade das ondas em água é complicada e bastante específica. Na Figura 12 está representado um gráfico da velocidade de fase como função do comprimento de onda: para ondas muito curtas ou muito longas, a velocidade é alta, mas existe uma velocidade mínima para a qual as ondas podem se propagar.

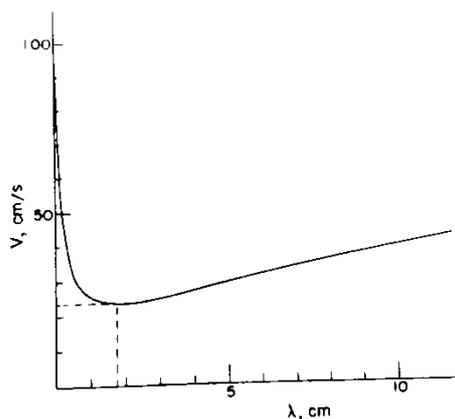


Figura 12 – Velocidade de fase em função do comprimento de onda para a água. ^[10]

Como a velocidade aumenta rapidamente conforme o comprimento de onda diminui, ao criar uma perturbação haverá uma extremidade mais lenta da perturbação que se propaga na velocidade mínima com o comprimento de onda correspondente, e logo na frente, viajando com velocidades mais altas estarão uma onda curta, que é observada na cuba, e uma onda muito longa, que não consegue-se observar. ^[10]

Pode-se calcular a velocidade de fase para as ondas principais produzidas na cuba. Considere um sistema de coordenadas como o da Figura 13, com sua origem na superfície sem distúrbio e com a dimensão x aumentando na direção de propagação da onda. Considere também que u e w são as componentes de velocidade das partículas nas direções x e z respectivamente, que h é a altura de água na cuba sem distúrbios e p é a pressão.

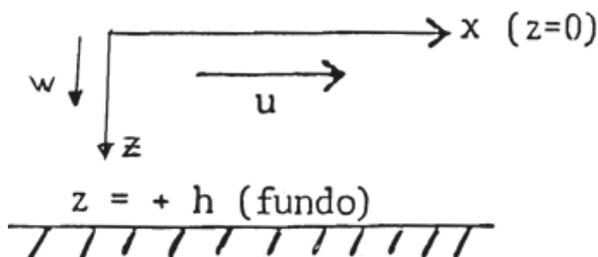


Figura 13 – Referencial utilizado para análise da velocidade de fase das ondas. Fonte: < https://www.danilovrveira.com/disciplinas/iof1202/ofd_capitulo14.php>.

Considere também as seguintes hipóteses: (1) A amplitude do distúrbio na superfície é muito pequena se comparada ao comprimento de onda e à profundidade; (2) O fluido é não viscoso e irrotacional (sem vorticidade); (3) O fluido é incompressível e homogêneo; (4) A aceleração de Coriolis pode ser desprezada; (5) A tensão na superfície pode ser desprezada. Sendo assim, excluem-se ondas muito longas ou muito curtas, neste tratamento. Da hipótese 3, tem-se que:

$$\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{10}$$

e da hipótese (2) resulta:

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{11}$$

Na direção z, a aceleração é devida apenas à pressão, ou seja,

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (12)$$

onde ρ é a densidade da água. Considerando as condições de contorno que $w = 0$ no fundo da cuba e que a pressão na superfície é a pressão atmosférica e, juntamente com as equações acima, obtém-se um problema linear de modo que uma onda harmônica simples é uma solução possível. Assim, a superfície pode ser assumida na forma dada pela equação (1), onde tomaremos, por simplicidade $\delta = 0$, e, como a direção de propagação foi definida, tem-se que $\vec{r} = \vec{x}$. Então:

$$u = A\omega \frac{\cosh(k(h-z))}{\sinh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (13)$$

$$w = A\omega \frac{\sinh(k(h-z))}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (14)$$

$$p = p_{atm} - \rho g z + \rho g A \frac{\cosh(k(h-z))}{\cosh(kh)} \cos(kA - \omega t) \quad (15)$$

e também:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (16)$$

Uma vez que a velocidade de fase é definida como

$$v_{fase} = \frac{\omega}{k} \quad (17)$$

tem-se que

$$v_{fase}^2 = \frac{g}{k} \tanh(kh) \quad (18)$$

Como a altura de água na cuba é pequena, pode-se considerar a aproximação $\tanh(kh) \approx kh$, portanto, ao módulo da velocidade de propagação da onda, num referencial fixo na cuba, pode ser dado pela expressão:

$$v \approx \sqrt{gh} \quad (19)$$

Portanto, quanto mais rasa for a lâmina de água, menor será o módulo da velocidade de propagação da onda. É possível observar essa dependência utilizando a cuba de ondas e o acessório (d), conforme ilustrado na Figura 14.



Figura 14 – Mudança de velocidade observada quando há mudança na profundidade da água. ^[1]

Em geral, para aplicações em sala de aula, as complicações encontradas na descrição das ondas em água são desconsideradas, e utiliza-se apenas a aproximação de oscilação harmônica.

Com o arranjo experimental da cuba de ondas é possível explorar as características das ondas em água rasas e, em nível básico, introduzir conceitos importantes como:

- Frentes de onda: conjunto de pontos que sofrem a perturbação através da propagação, em certo instante;
- Direção de propagação, dando margem à introdução do conceito de raio de onda, que são vetores perpendiculares às frentes de onda em cada ponto e fornecem a direção de propagação;
- Comprimento de onda λ : distância mínima entre quaisquer dois pontos idênticos em uma onda;
- Frequência f : número de oscilações por unidade de tempo.

A Figura 15 ilustra as ondas retas e circulares produzidas em uma demonstração realizada com cuba de ondas, onde as frentes de onda, raios de onda e comprimento de onda foram destacados e a Figura 16 ilustra diferentes frequências de ondas retas que podem ser produzidas na cuba.

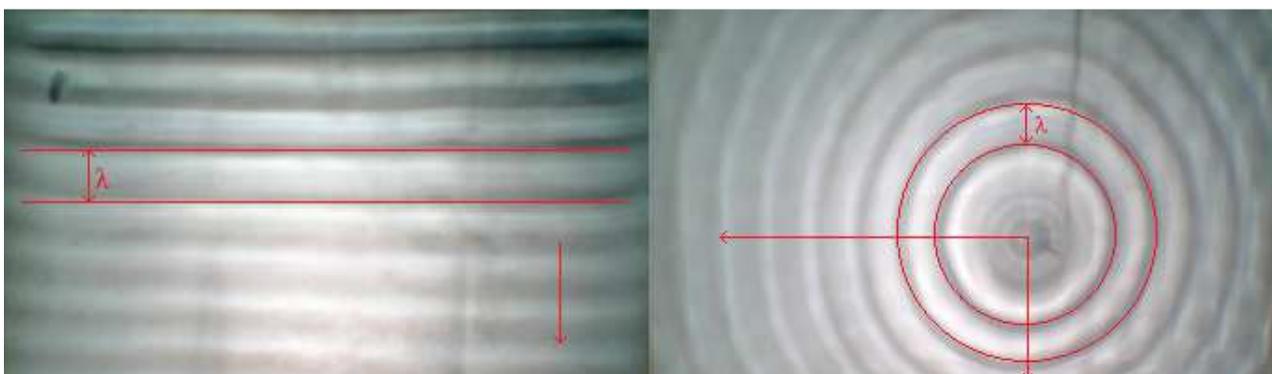


Figura 15 – Ondas retas, à esquerda, e ondas circulares, à direita, produzidas na cuba de ondas.



Figura 16 – Ondas retas com frequência e 8Hz, 20Hz e 60Hz. Ondas em frequências maiores são difíceis de enxergar, pois é necessário utilizar uma amplitude muito pequena para não espirrar água para todos os lados.

5.2 Reflexão e focalização

Em 1678, Huygens formulou um princípio de grande importância no estudo da propagação de ondas: todos os pontos de uma frente de ondas se comportam como fontes pontuais para ondas secundárias. Quando ondas retas ou circulares provenientes de uma fonte A encontram um obstáculo plano, produz-se reflexão de ondas porque cada ponto do obstáculo torna-se fonte de uma onda secundária, segundo o princípio de

Huygens. As ondas refletidas se comportam como se emanassem de uma fonte A', simétrica a A em relação ao obstáculo refletor.

Na reflexão de ondas, duas leis são obedecidas: o raio de onda incidente, o raio de onda refletido e a normal do obstáculo refletor são coplanares e ainda, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. Verifica-se também, que na reflexão, a frequência, a velocidade e o comprimento de onda não variam. Na cuba de ondas, utilizando o acessório (a) sem nenhuma fenda, é possível observar a reflexão em obstáculo reto para ondas retas e ondas circulares, como ilustra a Figura 17.

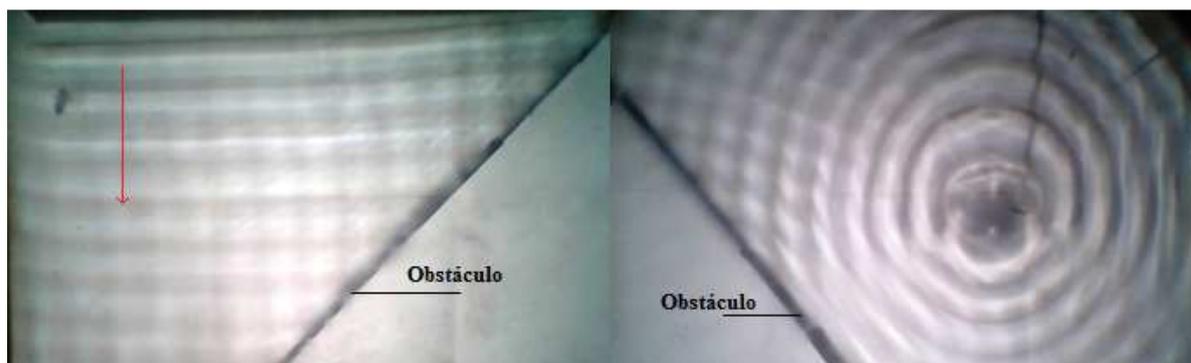


Figura 17 – Reflexão de ondas retas e circulares em um obstáculo reto. Na imagem das ondas retas foi destacado o raio de propagação das ondas (em vermelho) para facilitar a compreensão da imagem.

Nos espelhos esféricos, tem-se que quando um feixe de raios paralelos incide sobre o espelho paralelamente ao eixo principal, origina um feixe refletido convergente, no caso do espelho côncavo, e divergente, no espelho convexo. Esses raios refletidos ou seus prolongamentos vão se encontrar em um ponto chamado foco principal, que se encontra no ponto médio entre o vértice e o centro de curvatura do espelho, ou seja, $f = c/2$, onde c é a distância entre o ponto C e V, e f é a distância entre o ponto F e V. A Figura 18 ilustra a reflexão dos raios de onda em espelhos côncavos e convexos.

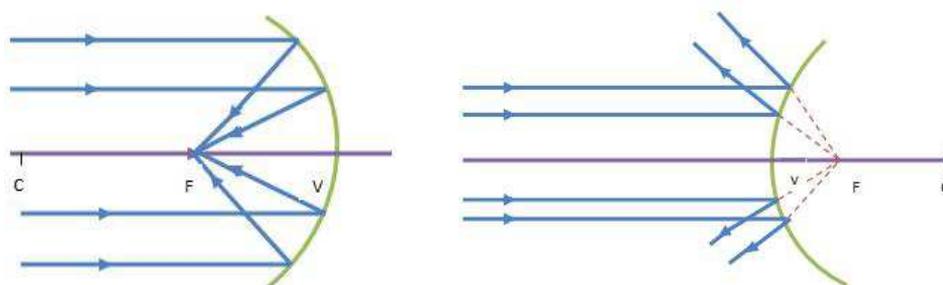


Figura 18 – Ilustração da reflexão dos raios em espelhos côncavos e convexos

Na cuba de ondas, quando o obstáculo onde ocorre a reflexão é côncavo, as frentes de ondas convergem para um ponto, o foco, analogamente à reflexão em um espelho côncavo. Quando as ondas incidem em um obstáculo convexo, obtém-se o mesmo tipo de reflexão observada em um espelho convexo. A Figura 19 ilustra as imagens obtidas na cuba quando o acessório (a) é trocado pelo acessório (c), na mesma configuração utilizada anteriormente com ondas retas.



Figura 19 – Reflexão de ondas retas em um obstáculo curvo. Utilizando este tipo de arranjo é possível explorar os conceitos envolvidos na reflexão de espelhos côncavos e convexos.

5.3 Difração

A difração é um fenômeno que acontece quando uma onda encontra um obstáculo, ocorrendo uma flexão das ondas em torno deste obstáculo. O fenômeno de difração também é descrito como o espalhamento das ondas após atravessar orifícios ou fendas. Esse alargamento ocorre conforme o princípio de Huygens. Produzindo-se ondas retas na cuba e inserindo, na água, um obstáculo qualquer, observa-se que as ondas sofrem um desvio na direção de propagação, transpondo o obstáculo. Se a onda atinge uma fenda entre dois obstáculos inseridos na água, se a largura desta fenda for menor ou igual ao comprimento de onda incidente, ela transpõe o obstáculo.

Produzindo ondas retas na cuba e utilizando os acessórios (a) e (b), observou-se o fenômeno da difração, conforme ilustrado na Figura 20. Com o arranjo de uma fenda, pode-se observar que a difração é mais perceptível quando a abertura da fenda é da ordem do comprimento de onda da onda incidente.



Figura 20 – Difração em um obstáculo (esquerda), difração em uma fenda (centro) e difração em duas fendas (direita).

A configuração de difração em fenda dupla, famosa devido ao experimento de Young, também oferece subsídio para o estudo da interferência, como será abordado a seguir.

5.4 Interferência

Quando duas ou mais ondas se propagam, simultaneamente, em um mesmo meio, ocorre uma superposição de ondas. Se estas ondas atingem um determinado ponto P no mesmo instante, elas causarão

nesse ponto uma perturbação que é igual à soma das perturbações que cada onda causa individualmente, ou seja:

$$\varphi(P) = \varphi_1(P) + \varphi_2(P) = \frac{a}{r_1} \cos(kr_1 - \omega t) + \frac{a}{r_2} \cos(kr_2 - \omega t) \quad (20)$$

O efeito da superposição de duas ou mais ondas é denominado interferência. Quando as ondas chegam em fase, a onda resultante é máxima, ou seja, a amplitude das ondas é somada, fato denominado interferência construtiva. Quando as ondas chegam em oposição de fase, os deslocamentos são de sinais opostos e a interferência é destrutiva.

Utilizando o oscilador 1 pode-se produzir duas ondas circulares, ambas com a mesma frequência e em fase, simultaneamente na água. A Figura 21 ilustra as ondas produzidas utilizando este sistema da cuba e, também, uma representação da interferência de duas ondas circulares onde as interferências construtivas e destrutivas são apontadas.

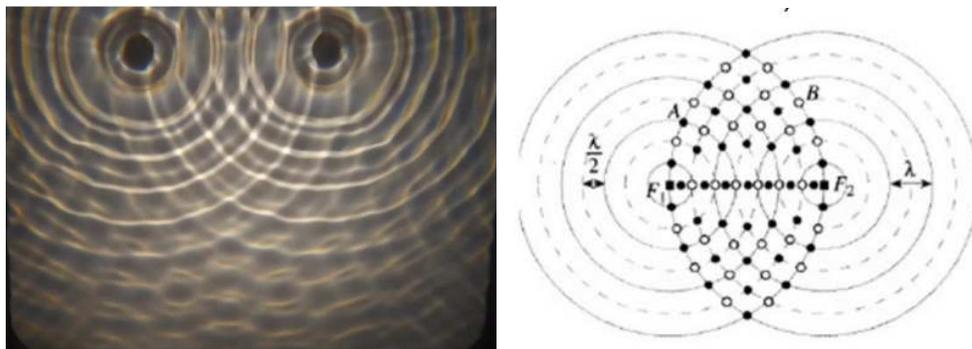


Figura 21 – Interferência entre duas ondas circulares. Foto das ondas obtidas utilizando a cuba de ondas, à esquerda, e representação dos pontos de interferência, à direita, onde os pontos escuros representam interferências construtivas, os pontos claros representam interferências destrutivas, as linhas cheias representam as cristas e as linhas pontilhadas, os vales.

Verifica-se que entre dois máximos de interferência existe sempre um mínimo situado exatamente no meio do caminho. As curvas obtidas unindo-se os pontos de interferência construtiva são chamadas de curvas ventrais e, as obtidas unindo-se os pontos de interferência destrutiva, de curvas nodais. Observe que na foto das ondas na Figura 21 é possível observar as curvas nodais.

É possível estabelecer uma condição para determinar onde se encontram os pontos de interferência construtiva e de interferência destrutiva. Nota-se que na interferência construtiva, a diferença de caminho entre as ondas produzidas pelas fontes deverá ser sempre um múltiplo inteiro do comprimento de onda, enquanto para interferência destrutiva, a diferença de caminho é um semi-inteiro do comprimento de onda. Considerando P um ponto de interferência, F_1 a posição de uma das fontes de oscilação e F_2 a posição da outra fonte, tem-se que:

$$\overline{PF_2} - \overline{PF_1} = n \frac{\lambda}{2} \quad (21)$$

onde, para n inteiro par ou zero tem-se interferência construtiva e para n inteiro ímpar, tem-se interferência destrutiva.

Utilizando um obstáculo com duas fendas, além de observar o fenômeno da difração, pode-se chegar à mesma conclusão sobre os pontos de interferência. Considerando a difração em duas fendas da Figura 20, tomando S_1 e S_2 como os pontos de cada fenda, R a distância do ponto médio entre as fendas e o ponto P onde considera-se a interferência e d a distância entre as fendas, pelo princípio de Huygens, tem-se que S_1 e S_2 são fontes puntiformes de ondas circulares que estão em fase e que se sobrepõem no ponto P . Considere os raios de onda que partem de S_1 e S_2 para P ilustrados na Figura 22. Para $R \gg d$, pode-se considerar que a diferença Δ do caminho percorrido pelas ondas provenientes de S_1 e S_2 é dada por

$$\Delta = r_2 - r_1 \approx d \sin \theta \quad (22)$$

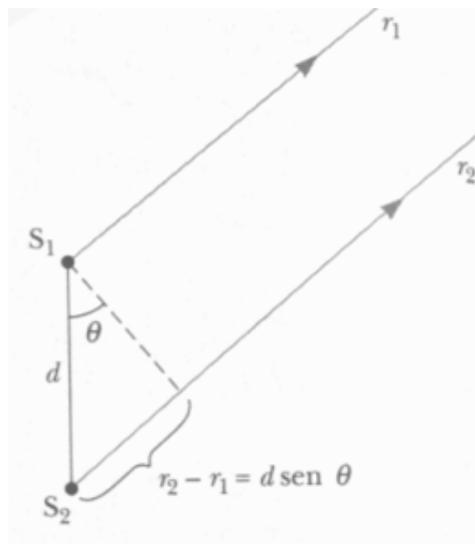


Figura 22 – Ilustração de dois raios de onda que partem das fendas S_1 e S_2 .

Para que a interferência seja construtiva, duas cristas ou dois vales devem se sobrepor, portanto Δ deve ser múltiplo inteiro do comprimento de onda. Para que a interferência seja destrutiva, uma crista deve se sobrepor com um vale e, portanto Δ deve ser um múltiplo semi-inteiro com comprimento de onda. Ou seja, $\Delta = m\lambda$, para interferência construtiva e $\Delta = (m + 1/2)\lambda$, para interferência destrutiva, onde m é um número positivo. Este é o mesmo resultado obtido com a interferência com duas fontes, expresso pela equação (21).

6. VÍDEO

Após a finalização do projeto, foram realizados pequenos vídeos das demonstrações descritas neste relatório e utilizando o software *Windows Movie Maker* esses vídeos foram compilados em apenas um. O vídeo final, cujo arquivo tem 44,1MB e foi nomeado por “Vídeo cuba de ondas”, foi apresentado ao Prof. Dr. Lunazzi e está disponibilizado para a disciplina.

7. COMENTÁRIO DO ORIENTADOR

O Prof. Dr. Thiago Alegre realizou comentários gerais sobre o tamanho das imagens e sobre alguns termos utilizados em versões anteriores deste relatório, solicitando pequenas mudanças que já foram realizadas. Comentou que o projeto ficou muito bom, tanto em relação à sua execução e apresentação quanto ao relatório, que trouxe uma explicação para ser explorada em salas de aula de Ensino Médio, mas também citou tópicos mais sofisticados. Em geral, ele se mostrou muito satisfeito com o trabalho realizado.

8. CONCLUSÕES

Utilizar as propriedades das ondas de água em uma sala de aula pode ser uma tarefa complexa, pois as ondas em água superficiais possuem muitas características que não triviais como sua velocidade e o movimento das gotículas de água no interior do meio. Portanto, é necessário tomar muito cuidado com a abordagem realizada em cada demonstração. Neste projeto, para todas as demonstrações propostas, foi considerada apenas uma análise simplificada do movimento das ondas em água, de modo que as demonstrações possam servir de exemplificação para alguns fenômenos de movimento ondulatório, sem perda de generalidade.

Alguns desafios foram enfrentados na construção da cuba de ondas, como otimizar as oscilações produzidas para formar uma imagem satisfatória das ondas e adequar os materiais disponíveis às necessidades do projeto, pois a ideia inicial é de reaproveitar o maior número de componentes possível. Apesar de ter obtido bons resultados, ainda há alguns pontos a serem trabalhados no projeto para melhorá-lo.

De modo geral, o projeto da cuba de ondas tem um grande potencial que pode ser explorado em aulas de física, abrangendo demonstrações em uma esfera mais simples, como demonstrado neste trabalho e, também, abrindo caminho para discussões mais complexas das propriedades de ondas em água.

REFERÊNCIAS

[1] SOUZA, M. P. M. **Cuba de ondas**. Relatório final para a disciplina “Instrumentação para o Ensino”. Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2004/011863Marcosp-RichardLanders_RF.pdf>.

[2] KIRCHNER, E. W. **Construção e filmagem da apresentação de uma cuba de ondas**. Relatório parcial para a disciplina “Instrumentação para o Ensino”. Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2005/ElvinW_Dirceu_RPD.pdf>

- [3] MARIN, F. C. **Produção de vídeo didático: Cuba de ondas.** Relatório final para a disciplina “Instrumentação para o Ensino”. Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2005/FabioC_Lunazzi_F809_RF1.pdf>
- [4] MARTINS, J. S. **Cuba de ondas: uma atividade prática para o ensino de física utilizando o programa AUDACITY.** Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/ea001009.pdf>>
- [5] BARROS, F. R. SANTOS, A. G. **Ondas de água: uma revisão ao nível médio.** Física na Escola, v.9, n.2, 2008. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol9/Num2/a05.pdf>>
- [6] NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica. Volume 2.** Editora Edgard Blücher. 4ª edição. 2002
- [7] SERWAY, R. A. JEWETT, J. W. **Princípios de Física. Volume 2. Movimento Ondulatório e Termodinâmica.** Tradução da 3ª edição Norte-americana. Editora Thomson.
- [8] BONJORNO, J. R. et.al. **Física 2.** Editora FTD S.A. 1ª edição. 1946.
- [9] UFSM. **A cuba de ondas.** Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/gef/Ondas/ondas10.pdf>>
- [10] FEYNMAN, R. P; et.al. **Lições de Física. Volume 1.** 2ª edição. Editora Bookman. 2008
- [11] HARARI, J. **Ondas no oceano.** Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 2007. Disponível em: <https://www.danilorvieira.com/disciplinas/iof1202/ofd_capitulo14.php>