Construção de um defletor de laser por alto-falantes

Rickson C. Mesquita *
José J. Lunazzi †
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Campinas, 28 de junho de 2002

Resumo

O objetivo deste trabalho foi construir um defletor por laser a fim de observar o efeito da conversão do movimento linear em angular através da deflecção da luz emitida por laser de diodo sobre um espelho fixado no cone da bobina de um alto-falante, conectado a um amplificador e uma fonte sonora. Baseado nisto, fomos buscar uma imagem estereográfica da figura obtida com a luz refletida pelo espelho. Obtivemos tal imagem, porém o que apresentamos é um resultado final que pode ainda ser melhorado, uma vez que os equipamentos podem ser aperfeiçoados e os ruídos e vibrações do sistema diminuídos, mostrando assim que muito trabalho pode ser feito nesta área, e principalmente em cima deste projeto. O modelo cons- truído também foi justificado por meio da teoria envolvida em todo o processo. Como consequência, acreditamos acima de tudo que os princípios físicos e o protótipo apresentado ilustram bem os conceitos envolvidos no projeto, conforme proposto, entre outros objetivos, na disciplina de Instrumentação para Ensino.

*rmesquita@gmx.de
†lunazzi@ifi.unicamp.br

1 Introdução

1.1 O Movimento Ondulatório

Quando tocamos uma campainha ou um instrumento musical, ou quando ligamos o rádio ou falamos em voz alta, produz-se um som que é ouvido em pontos afastados. O som transmite-se através do ar envolvente. Se nos encontrarmos numa praia e, a uma certa distância, passar um barco que vai a uma grande velocidade, observamos que, ao fim de certo tempo, chegam até nós as ondas provocadas pelo barco. Quando acendemos um foco de luz, a sala enche-se de luz. Como resultado das relações físicas entre os campos elétricos e magnéticos, é possível transmitir um sinal elétrico de um local para outro; esta é a base das técnicas modernas de telecomunicações. Embora os mecanismos possam ser diferentes para cada um dos processos mencionados, todos têm uma característica em comum: são situações físicas produzidas num ponto do espaço que se propaga através deste e são percebidas, mais tarde, em outro ponto. Estes processos são exemplos de movimento ondulatório.

Suponhamos que temos uma propriedade física que se estende a uma certa região do espaço. Esta propriedade pode ser um campo eletromagnético, a deformação de uma mola, a deformação de um sólido, a pressão de um fluido, um deslocamento transversal numa corda, ou até mesmo um campo gravitacional. Suponhamos que as condições num lugar do espaço se tornam dependentes do tempo, ou dinâmicas, de modo que haja uma perturbação do estado físico no referido lugar. Dependendo da natureza física do sistema, a perturbação pode propagar-se no espaço, modificando as condições em outros lugares. Por isso, falamos de uma onda associada à propriedade física que foi perturbada, ou que depende do tempo.

Existem vários tipos de ondas, entre elas as ondas elásticas e eletromagnéticas. Os aspectos mais importantes das ondas são a sua velocidade de propagação e as modificações que sofrem quando variam as propriedades físicas do meio em que se propagam (reflexão, refração, polarização), quando se intercalam diferentes espécies de obstáculos (difração, espalhamento) ou quando várias ondas coincidem na mesma região do espaço (interferência).

Consideremos uma função $\xi = f(x)$. Substituindo x por $x - x_0$, obtemos $\xi = f(x - x_0)$. Se $x_0 = vt$, onde t é o tempo, a função $\xi = f(x - vt)$ representa uma curva que se move para a direita com velocidade v, designada por velocidade de fase. Analogamente, $\xi = f(x + vt)$ representa uma curva que se desloca para a esquerda com velocidade v.

Um caso especialmente interessante é quando $\xi(x, t)$ é uma função

senoidal, tal que $\xi(x,t) = \xi_0 sen[k(x - vt)]$. A grandeza k possui um significado especial, pois substituindo o valor de x por $x + 2\pi/k$, obtemos o mesmo valor para $\xi(x,t)$, isto é,

$$\xi(x+2\pi/k,t) = \xi_0 sen[k(x+2\pi/k-vt)] = \xi_0 sen[k(x-vt)+2\pi] = \xi(x,t) \tag{1}$$

Podemos definir a grandeza $\lambda = 2\pi/k$ como o comprimento de onda, isto é, a curva se repete a cada comprimento λ. A grandeza k representa o número de comprimentos de onda que existem na distância 2π e designa-se número de onda. A equação acima também pode ser escrita na forma $\xi(x,t) = \xi_0 sen(kx - \omega t)$, onde $\omega = kv = 2\pi v/\lambda$ dá a frequência angular da onda. Também podemos dizer que $\omega = 2\pi\nu$, onde ν é a frequência com que a situação física varia em cada ponto x. Daí, podemos tirar a importante relação entre o comprimento de onda, a frequência e a velocidade de propagação:

$$v = \lambda\nu \tag{2}$$

Ainda, se T for o período de oscilação em cada ponto, dado por $T = 2\pi/\omega = 1/\nu$, podemos escrever ainda que $\xi(x,t) = \xi_0 sen[2\pi(x/\lambda - t/T)]$. Temos, portanto, no movimento ondulatório senoidal, duas periodicidades: uma no tempo, dada pelo período T, e outra no espaço, dada pelo comprimento de onda λ. A relação entre elas é $\lambda = vT$.

Embora os campos associados a cada processo físico, numa onda, sejam regidos por leis dinâmicas características de cada processo, existe uma equação aplicável a todo tipo de movimento ondulatório, do mesmo modo que a lei de Newton se aplica a todos os movimentos de partículas não-relativísticas, quaisquer que sejam as forças. Esta equação que descreve o movimento ondulatório é:

$$\nabla^2\xi(x,t) - \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\xi(x,t)}{\partial t^2} = 0 \tag{3}$$

A solução geral desta equação tem a forma que vimos analisando para ξ, ou seja:

$$\xi(x,t) = f(x - vt) + f(x + vt) \tag{4}$$

Assim, a solução geral da equação (3) pode ser expressa como a sobreposição de dois movimentos ondulatórios que se propagam em direções opostas. Para uma onda que se propaga numa direção, apenas se necessita de uma das duas funções que estão na equação (4).

1.2 A Física do Som

O som é um tipo de onda longitudinal de pressão num gás. As variações de pressão num gás produzem ondas elásticas, que consistem

em compressões e expansões que se propagam ao longo do gás (no caso do som, o ar).

Consideremos uma coluna de gás dentro de um tubo. Sejam p e ρ a pressão e a densidade do gás. Em condições de equilíbrio, p e ρ são os mesmos em todo o volume do gás, isto é, são independentes de x. Se peturbarmos a pressão do gás, colocaremos em movimento um elemento de volume, A.dx, devido ao fato de as pressões nos lados deste pequeno volume serem diferentes, p e p', dando lugar a uma força resultante. Em consequência, a seção A desloca-se uma distância ξ e a seção A', uma distância $\xi + d\xi$, de modo que a espessura do elemento de volume, depois da deformação, é $dx + d\xi$.

Figura 1: *Perturbação num gás*

Como os gases são muito compressíveis, quando se produzem variações de pressão, as suas densidades sofrem o mesmo tipo de variação que a pressão. Para descrever tal variação, é conveniente definir a grandeza

$$\kappa = \rho \left(\frac{dp}{d\rho} \right) \tag{5}$$

designada módulo volumétrico de elasticidade, que dá a variação da pressão (dp) por unidade de variação da densidade ($d\rho/\rho$).

O gás que está à esquerda do elemento de volume limitado pelas seções A e A' empurra para a direita com uma força $F = pA$ e o gás que está à direita empurra com uma força p'A', para a esquerda. Por isso, quando A=A', a força resultante sobre o elemento de volume é (p - p')A. O movimento do elemento de volume dá origem a uma onda que se propaga no gás. Não analisaremos a equação de movimento do elemento, pois este não é o objetivo do trabalho. Diremos apenas que, se as variações de pressão não forem muito grandes, o deslocamento ξ satisfaz a equação de onda (3), com uma velocidade de propagação

$$v = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}} \tag{6}$$

onde ρ é a densidade média (ou de equilíbrio), e o deslocamento, devido à perturbação do gás, propaga-se como uma onda longitudinal.

A pressão obedece à mesma equação de onda, de modo que as variações de pressão produzidas pela onda propagam-se com a velocidade dada na equação (6). Esta é a razão porque chamamos as ondas

elásticas num gás como ondas de pressão. O som é simplesmente uma onda de pressão no ar.

Em linguagem corrente, o conceito de som está relacionado com o sentido da audição. Sempre que uma onda elástica se propaga num gás, líquido ou sólido e chega ao nosso ouvido, produz vibrações na sua membrana. Estas vibrações provocam uma resposta nervosa que constitui o processo conhecido como ouvir. O nosso sistema nervoso produz a sensação de som apenas para frequências que vão desde 16 Hz até 20.000 Hz, aproximadamente. O intervalo de frequências pode variar de uma pessoa para outra, e é diferente para os animais. Fora destes limites, o som não é audível, mas as ondas elásticas designam-se, ainda, som. A física das ondas elásticas com frequências superiores a 20.000 Hz designa-se ultra-sônica. Esta tem muitas aplicações na indústria e na medicina.

1.3 A Figura de Lissajous

A composição gráfica de dois movimentos ondulatórios, um na horizontal e outro na vertical, resulta na chamada figura de Lissajous. Considerando um movimento ondulatório na horizontal, podemos representá-lo por

$$x = Acoswt \tag{7}$$

e analogamente, podemos representar um movimento ondulatório na vertical por

$$y = Bcos(wt + \delta) \tag{8}$$

onde δ é a diferença de fase entre as oscilações na horizontal e na vertical. Para tratar um caso mais geral, podemos considerar que as amplitudes A e B são diferentes. Quando $\delta = \pi/2$, dizemos que os movimentos na horizontal e na vertical estão em quadratura. As equações são dadas por

$$x = Acoswt \text{ e } y = Bcos(wt + \pi/2) = -Bsenwt \tag{9}$$

Podemos combinar estas equações, elevar ao quadrado e somar, para obtermos

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1 \tag{10}$$

que é a equação de uma elipse. Assim, pode-se dizer que a sobreposição de dois movimentos ondulatórios de mesma frequência produz um movimento elíptico. Os eixos da elipse são paralelos às direções dos dois movimentos. Quando A = B, a elipse transforma-se num círculo, e teremos um movimento circular. O movimento circular pode, portanto, ser gerado pela combinação de dois movimentos oscilatórios

com a mesma frequência e a mesma amplitude, ao longo de direções perpendiculares, com uma diferença de fase de $\pm\pi/2$.

Para um valor arbitrário da diferença de fase δ, a trajetória é ainda uma elipse, mas os seus eixos estão girados em relação aos eixos coordenados. Outra situação de interesse é a sobreposição de dois movimentos oscilatórios perpendiculares de frequências distintas w_1 e w_2. As equações de movimento seriam:

$$x = Acosw_1t \text{ e } y = Bcos(w_2t + \delta) \tag{11}$$

Neste caso, a trajetória resultante depende da relação $w_2 : w_1$ e da diferença de fase δ. Na figura 2 pode-se ver algumas destas trajetórias.

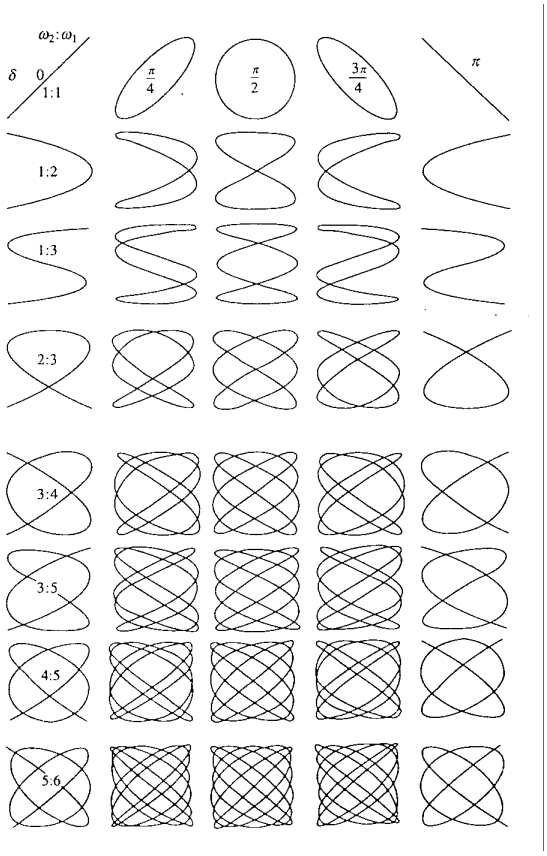

Figura 2: *Figuras de Lissajous.*

1.4 O Alto-Falante

Um alto-falante é um dispositivo que converte energia elétrica em som. Os modelos mais comuns são constituídos por um cone (mem-

brana), onde uma pequena bobina cilíndrica é fixada no seu centro. A bobina está num campo magnético de um magneto permanente. As linhas do campo magnético radial estão num plano perpendicular ao eixo de vibração da bobina. Uma corrente alternada através desta faz a membrana vibrar, produzindo assim ondas sonoras.

Vamos considerar um alto-falante no qual a bobina é alimentada por uma voltagem senoidal V, de amplitude V_0 e frequência angular ω. A corrente alternada i que passa através da bobina tem amplitude i_0. A força F sobre a bobina (e o movimento que resulta desta força) está na direção $\hat{\mathrm{x}}$, e pode ser escrita como

$$\vec{F} = i\vec{l}\mathrm{x}\vec{B} = Bli\hat{\mathrm{x}} \tag{12}$$

onde B é o campo magnético na bobina e l é o tamanho do fio na bobina. Como o movimento da bobina é perpendicular ao campo magnético, e o fio é perpendicular ao campo e ao movimento, há uma força eletromotriz induzida, dada por

$$E = Blu \tag{13}$$

onde u é a velocidade da bobina.

Se o alto-falante vibra com uma amplitude pequena, comparada com o seu limite de alcance, podemos ver o sistema como linear. Assim, todas as quantidades oscilatórias podem ser expressas por funções senoidais com frequência angular temporal ω. Seja x a posição do ponto central da membrana (fixa em relação à bobina) sobre o eixo x, e seja a posição de equilíbrio $x = 0$, que ocorre na ausência de voltagem externa aplicada. Em termos de variáveis complexas (simbolizadas por ˆ sobre a variável), podemos dizer que

$$\hat{\mathrm{F}} = Bl\hat{\mathrm{i}} \tag{14}$$

e

$$\hat{\mathrm{E}} = Bl\hat{\mathrm{u}} = jwBl\hat{\mathrm{x}} \tag{15}$$

onde a derivada temporal $\mathrm{d}\hat{\mathrm{x}}/\mathrm{dt}$ foi substituída por $\mathrm{jw}\hat{\mathrm{x}}$, onde j é o número imaginário puro. Como o produto Bl é um número real, j na equação significa que E e u estão defasados de 90 graus.

Do ponto de vista eletrônico, sejam R e L a resistência elétrica e a indutância da bobina, respectivamente. Diremos também que a bobina e a membrana formam um conjunto com massa total m, constante elástica k e constante de dissipação (devido ao atrito e som) b. Por simplicidade, vamos assumir que a membrana e a bobina movem-se juntas como um corpo rígido, que é uma boa aproximação para

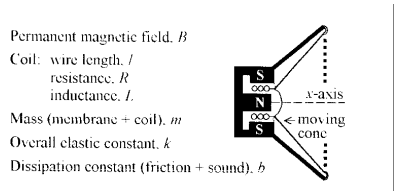

Figura 3: *Desenho esquemático do alto-falante.*

baixas frequências, na qual o comprimento de onda do som é grande comparado com o diâmetro do alto-falante. Assim, podemos escrever

$$\hat{\mathrm{V}} = \hat{\mathrm{E}} + R\hat{\mathrm{i}} + jwL\hat{\mathrm{i}} \tag{16}$$

onde a queda de tensão sobre o indutor (Ldi/dt) foi escrita como $jwL\hat{\mathrm{i}}$. Do lado mecânico, podemos utilizar a lei de Newton para escrever

$$\hat{\mathrm{F}} - k\hat{\mathrm{x}} - jwb\hat{\mathrm{x}} = -mw^2\hat{\mathrm{x}} \tag{17}$$

onde $k\hat{\mathrm{x}}$ é a força elástica e $bu = jwb\hat{\mathrm{x}}$ é a força de atrito. Eliminando $\hat{\mathrm{F}}$ nas equações acima, podemos escrever

$$\frac{x_0}{i_0} = \frac{\frac{Bl}{k}}{\left(\left(1 - w^2\frac{m}{k}\right)^2 + w^2\frac{b^2}{k^2}\right)^{1/2}} \tag{18}$$

Como podemos ver, um campo magnético forte, com um comprimento de fio longo, e um coeficiente elástico pequeno faz o efeito do movimento maior. A impedância do alto-falante pode ser calculada resolvendo as equações (14), (15), (16) e (17). Daí, obtemos

$$Z_0 = \frac{V_0}{i_0} = \left[\left(R + \frac{\frac{(Bl)^2}{b}}{\alpha}\right)^2 + w^2\left(L + \frac{\frac{(Bl)^2}{k}}{\beta}\right)^2\right]^{1/2}, \tag{19}$$

onde $\alpha = 1 + \frac{1}{w^2}\frac{k^2}{b^2}\left(1 - w^2\frac{m}{k}\right)^2$ e $\beta = \left(1 - w^2\frac{m}{k}\right) + \frac{1}{\frac{1}{w^2}\frac{k^2}{b^2}\left(1 - w^2\frac{m}{k}\right)}$.

1.5 O Laser

No início da década de 1940, a mecânica quântica trouxe uma grande contribuição para a tecnologia: o laser. A luz laser é emitida quando átomos fazem uma transição de um estado quântico para outro estado quântico de mais baixa energia. Num laser, diferentemente de outras fontes de luz, os átomos atuam juntos para produzir luz com

características especiais, como alta monocromaticidade e intensidade, coerência e colimação do feixe. A palavra laser é uma abreviação para "Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation" e, como o próprio nome diz, utiliza o conceito de emissão estimulada, proposto por Einstein em 1917.

Considerando dois estados de um átomo isolado, o estado fundamental com energia E_0 e um estado excitado com energia E_x, a passagem de um estado para outro pode ocorrer de três formas:

1. Absorção, onde um átomo no estado fundamental, se colocado num campo eletromagnético com frequência alternada ν, pode absorver uma quantidade de energia $E = h\nu$ do campo e fazer uma transição para o estado de mais alta energia, onde $h\nu = E_x - E_0$;
2. Emissão Espontânea, onde depois de um certo tempo t, um átomo no estado excitado e sem radiação presente irá retornar ao seu estado fundamental, emitindo um fóton de energia $E = h\nu$ no processo, de maneira espontânea, isto é, sem influência externa;
3. Emissão Estimulada, onde um fóton externo, com energia $E = h\nu$, pode estimular um átomo inicialmente no estado excitado a fazer uma transição para o estado fundamental, e neste processo o átomo emite um outro fóton, cuja energia também é $h\nu$.

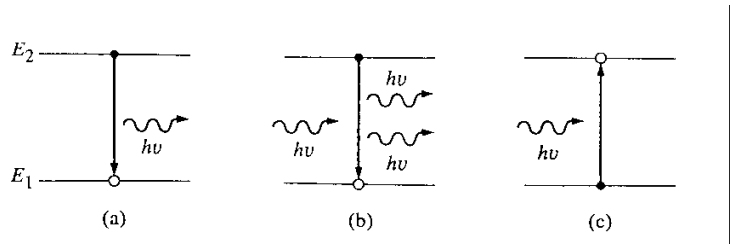

Figura 4: *Transições radioativas: (a) emissão espontânea; (b) emissão estimulada; (c) absorção.*

Suponhamos então uma amostra com um grande número de átomos em equilíbrio térmico à temperatura T. Inicialmente, temos um número N_0 destes átomos no estado fundamental com energia E_0, e N_x átomos com energia mais alta E_x. Se enviarmos nesta amostra fótons de energia $E_x - E_0$, alguns deles vão desaparecer, via absorção pelos átomos inicialmente no estado fundamental, enquanto outros fótons serão gerados, via emissão estimulada pelos átomos no estado excitado. Para

produzir luz laser, devemos ter mais fótons emitidos do que absorvidos, ou seja, devemos ter uma situação inicial na qual temos mais átomos no estado excitado do que no estado fundamental. Uma vez conseguido isto, podemos gerar luz laser.

1.6 Estereogramas

Os estereogramas são basicamente imagens em 3D "escondidas" no plano, e que são combinadas através do cérebro, gerando a ilusão de uma imagem em volume. Os estereogramas surgiram através da estéreoscopia e se desenvolveram com o aperfeiçoamento da fotografia e com a popularização dos estereógrafos, nas primeiras décadas deste século. Na década de 60, o Dr. Bella Julesz desenvolveu um novo processo de produção de imagens tridimensionais. As imagens do dr. Julesz eram geradas por um computador que distribuía pontos ao acaso. Essas imagens eram usadas para o estudo da percepção de profundidade na visão humana. Com o passar do tempo, essa técnica saiu dos laboratórios e ganhou as galerias de arte. A partir de então a febre das imagens em 3D tomou conta do mundo, onde a cada dia uma nova maneira de concepção de imagens é criada até hoje. Existem os papéis de parede, anaglifos, as fotos estereoscópicas, estereogramas personalizados...

Um efeito deste tipo pode ser conseguido de maneira bastante simples. Projetando duas imagens com polarizações perpendiculares uma em relação à outra, de tal forma que ambas estejam numa tela à mesma altura, e deslocadas horizontalmente uma da outra, podemos fazer com que nosso cérebro combine estas duas imagens numa única imagem tridimensional, provocando-nos a sensação de profundidade.

2 O Projeto

2.1 Objetivos

Defletimos a luz emitida por um laser de diodo, colocando um espelho no cone sobre a bobina móvel de alto-falantes, tendo assim uma visão aumentada do movimento linear, que é convertido em angular pelo suporte do espelho. Conectamos uma fonte sonora num amplificador de estado sólido da década de 70, e neste três amplificadores, sendo dois deles em paralelo. Com a fonte sonora ligada, fizemos um dos amplificadores oscilar na direção vertical, enquanto os dois em paralelo oscilavam na direção horizontal. Com dois lasers de diodo, polarizados em direções perpendiculares entre si, fizemos a luz emitida por estes incidir no espelho que oscila na vertical, e cada um dos feixes

incidiu num dos espelhos oscilando na horizontal. Ambas as figuras foram projetadas numa tela, coincidindo suas projeções na vertical e deslocadas por uma distância de alguns centímetros na horizontal, apenas com diferença de polarização entre elas, para que pudéssemos vê-la em tridimensional.

2.2 Resultados e Discussão

O sistema montado pode ser visto na figura 5. Os alto-falantes, com raio de 8 cm, estão conectados a um amplificador, que por sua vez está conectado a uma fonte sonora. Dois lasers de diodo, colocados a 25 cm de altura em relação ao "solo" do sistema, emitem feixes de luz polarizados de forma perpendicular entre si, que atinjem o primeiro alto-falante que vibra na direção vertical, e lá são refletidos por um espelho de plástico, onde cada um dos feixes se dirige para os outros dois alto-falantes conectados em paralelo e vibrando na direção horizontal, sendo também refletidos por outro espelho igual ao primeiro, e finalmente são focalizados num anteparo, situado a alguns metros do sistema inicial.

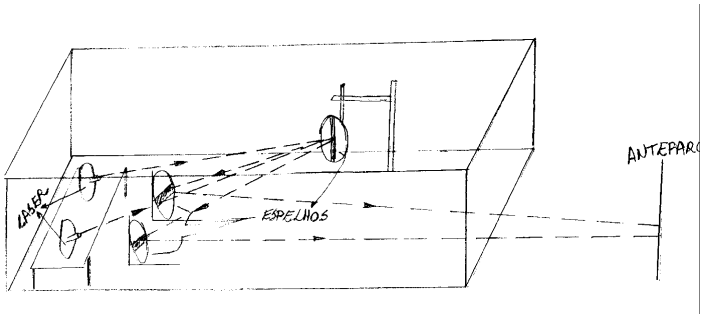

Figura 5: *Sistema montado*

A composição do movimento vertical do primeiro alto-falante com o movimento horizontal do segundo forma uma figura de Lissajous, que é defletida com a luz emitida pelo laser. Como temos dois feixes independentes, forma-se no anteparo duas figuras de Lissajous idênticas, com polarizações perpendiculares entre si. Alinhando o sistema, de tal forma que ambas as figuras estejam na mesma posição vertical, e distanciadas horizontalmente de alguns poucos centímetros, pode-se ver um estereograma da imagem formada no anteparo, colocando-se um óculos polarizador.

A vantagem de utilizar um espelho de plástico se dá devido à massa deste, que é menor, possibilitando um melhor acompanhamento na

amplitude do sinal elétrico, que é convertido numa variação de pressão no ar, emitida pelo alto-falante. No entanto, vimos que o plástico altera a polarização do feixe de luz, constituindo-se num efeito não desejado. Felizmente, o sistema tem flexibilidade para alterar a polarização do feixe emitido pelo laser, e através da imagem já projetada no anteparo foi possível acertar a polarização do feixe, de forma que eles ficassem polarizados perpendicularmente depois que tivessem sido refletidos.

O anteparo utilizado foi uma superfície de alumínio, pois entre outras vantagens este material diminui a intensidade do feixe polarizado, melhorando com isto a formação da imagem estereográfica.

A imagem que se forma é variada, uma vez que a fonte sonora emite sons em diferentes frequências durante um intervalo de tempo muito rápido, chegando a formar várias figuras de Lissajous, com diferentes formas devido à relação entre as frequências dos movimentos horizontal e vertical. Analisamos o comportamento das figuras para variados tipos de sons, e constatamos que para músicas mais rápidas a sensação de profundidade não é muito perceptível, uma vez que a variação da frequência se dá de forma mais acentuada.

3 Conclusão

O projeto proposto mostrou-se válido na aquisição de conhecimentos, principalmente em óptica e eletrônica. Através deste foi possível estudar as figuras de Lissajous e a formação de imagens estereográficas. O sistema foi projetado para que a luz emitida por laser fosse defletida por espelhos planos, a fim de visualizá-la em três dimensões no plano.

Apesar de um experimento bastante simples e que utiliza equipamentos de fácil acesso, deve-se tomar muito cuidado ao projetá-lo. Uma das maiores dificuldades está no alinhamento do conjunto, de forma a fazer a luz emitida pelo laser refletir nos dois espelhos e chegar no anteparo, afinal estamos trabalhando com equipamentos sensíveis, e por isto um ajuste fino é extremamente útil neste tipo de tratamento experimental. O caminho torna-se um pouco mais dificultado quando precisamos criar uma harmonia no conjunto para dois feixes provenientes de equipamentos diferentes. Além de tudo isto, é necessário conciliar todo o alinhamento com a polarização do feixe!

Vimos também que é possível uma explicação teórica a respeito do modelo construído, e analisamos diferentes situa- ções, como o tipo de anteparo e a variação de sons. No entanto, este projeto foi apenas um protótipo, ilustrando os conceitos básicos e mostrando a viabilidade do sistema. É possível um modelo mais aperfeiçoado deste, onde os ruídos e vibrações podem ser diminuídos e a disposição dos equipamentos

otimizada. Acima de tudo, acreditamos que o protótipo apresentado ilustra os conceitos envolvidos de forma simples, sendo mais uma idéia de instrumento para ensino de física.

4 Agradecimentos

Muitas pessoas foram importantes para a realização deste trabalho. Gostaria de manifestar meus agradecimentos ao Claudemir, pelo suporte na área de Eletrônica, sempre com muita dedicação e disposição de transmitir ensinamentos. Ao Agnaldo, pelo apoio e ajuda em conversas sobre alto-falantes, que permitiu-me elaborar conceitos e desenvolver teorias sobre este equipamento. E principalmente ao meu orientador, Prof. Dr. José J. Lunazzi, sem o qual não teria sido possível a realização do mesmo.

5 Bibliografia

- Alonso, M. e Finn, E. J. Física. Ed. Addison-Wesley, 1999.
- Halliday, D., Resnick, R. e Walker, J. Fundamentals of Physics Extended. John Wiley & Sons, 1997.
- Krane, K. Modern Physics. John Wiley & Sons, 1996.
- Silva, H. S. Acústica Técnica. Ed. H. Sheldon, 1996.
- Small, R. H. Simplified Loudspeaker Measurement at low frequencies. Journal of Audio Engineering Society, 20:p. 28-36, 1972.
- Jenkis, F. A. Fundamentals of Optics. McGraw-Hill, 1976.
- Wilson, J. A. Eletrônica Básica: teoria e prática. Hideel, 1985.