

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

GERALDO MAJELLA BLANC AMORIM

**CONSTRUÇÃO DE UM MICROFONE ÓPTICO COMPACTO E DE
BAIXO CUSTO**

Campo Grande – MS

2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

GERALDO MAJELLA BLANC AMORIM

**CONSTRUÇÃO DE UM MICROFONE ÓPTICO COMPACTO E DE
BAIXO CUSTO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Física Aplicada da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Física, sob orientação do Professor Dr. Carlos Alberto Vinha.

Campo Grande – MS

2009

GERALDO MAJELLA BLANC AMORIM

**CONSTRUÇÃO DE UM MICROFONE ÓPTICO COMPACTO E DE
BAIXO CUSTO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Física Aplicada da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Física, sob orientação do Professor Dr. Carlos Alberto Vinha.

Data da Defesa: _____/2009

Prof. Dr. Carlos Alberto Vinha (UFMS)

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. Evandro Mazina Martins (UFMS)

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. Armando Cirilo de Souza (UEMS)

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. João Vítor Batista Ferreira (UFMS)

Julgamento: _____

Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Ao Deus Todo Poderoso, que tudo nos proporciona.

Ao prezado Prof. Dr. Carlos Alberto Vinha, pela orientação, sugestões e incentivo.

A minha amada esposa Soraya Cleide Andrade Amorim, pelo companheirismo, compreensão, dedicação e orações.

À minha filha Sarah e ao meu filho Miguel, pela paciência e compreensão.

Aos meus pais Ari e Maria do Carmo, pela criação e educação dadas a mim.

Aos meus amados Irmãos em Cristo, pelas muitas orações.

Ao Técnico Valdeir do Laboratório de Física da UFMS, pelas idéias, sugestões e auxílio na solução dos problemas relacionados ao aparato eletrônico.

À UFMS, através dos Professores e Funcionários.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Pesquisas com o microfone óptico mostraram sua alta sensibilidade como transdutor, que pode colaborar significativamente na ampliação do potencial investigativo da Técnica Fotoacústica.

No objetivo de contribuir para o aperfeiçoamento do referido dispositivo, apresentamos neste trabalho uma alternativa de construção, denominada de Microfone Óptico Compacto (MOC), que proporciona miniaturização e redução de custo.

Apresentamos também os resultados obtidos com os protótipos desenvolvidos e comparação com os resultados de um microfone convencional B&K.

Por fim, indicamos as diretrizes dos aperfeiçoamentos necessários, a fim de alcançar desempenho mais elevado.

Palavras-chaves: Microfone óptico, microfone óptico compacto, célula fotoacústica convencional.

ABSTRACT

Researches with the optical microphone showed its high sensitivity as transducer, which can contribute significantly to the enlargement of the investigative potential of the Optoacoustic Technique.

With the purpose of contributing for improvement of the referred device, we introduce in this work an alternative of construction, named Compact Optical Microphone (COM), which provides miniaturization and cost reduction.

We present also the results obtained with the developed prototypes and the comparison with the results of a conventional microphone B&K.

Finally, we indicate the necessary improvement guidelines, in order to attain higher performance.

Keywords: Optical microphone, compact optical microphone, conventional photoacoustic cell.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de uma célula fotoacústica.....	15
Figura 2.2: Perfis de absorção óptica de três classes distintas de amostras.....	16
Figura 2.3: Perfil de profundidade por variação da frequência.....	19
Figura 2.4: Representação fasorial da variação de pressão.....	23
Figura 2.5: Representação fasorial do sinal fotoacústico.....	25
Figura 2.6: Circuito típico de ligação de um microfone condensador.....	30
Figura 3.1: Elemento sensível do microfone óptico.....	31
Figura 3.2: Célula fotoacústica do microfone óptico (MO).....	32
Figura 3.3: Diagrama do MO convencional.....	33
Figura 4.1: Unidade óptica de um leitor de CD.....	35
Figura 4.2: Esquema interno de um pick-up do leitor de disco compacto.....	36
Figura 4.3: Esquema do Microfone Óptico Compacto.....	37
Figura 4.4a: Protótipo nº1 do MOC.....	38
Figura 4.4b: Protótipo nº1 do MOC encerrado em uma caixa acrílica.....	38
Figura 4.5a: Protótipo nº2 do MOC.....	39
Figura 4.5b: Vista traseira do protótipo nº2 do MOC.....	39
Figura 4.5c: Comparação do protótipo nº2 com o tamanho de uma caneta.....	40
Figura 5.1: Diagrama esquemático de um espectrômetro fotoacústico.....	42
Figura 5.2: Fotos de um espectrômetro fotoacústico.....	43
Figura 5.3: Elemento sensível do Microfone Óptico Compacto – MOC.....	45
Figura 5.4: Gráfico da frequência de ressonância f_r x comprimento L da haste.....	47
Figura 5.5: Gráfico da frequência de ressonância f_r x diâmetro D da haste.....	48
Figura 5.6: Pick-up KSS210A	49
Figura 5.7: a - Função de cada pino do KSS210A.....	49
Figura 5.8: Esquema de ligação da pick-up no MOC.....	50
Figura 5.9: Circuito eletrônico do pré-amplificador utilizado no MOC.....	51
Figura 5.10: Curva de ganho x frequência do sinal de entrada do amplificador.....	51
Figura 5.11: Circuito eletrônico da fonte do laser.....	52
Figura 5.12: Desenho da célula fotoacústica com microfone B&K modelo 4192.....	54
Figura 6.1: Gráfico da curva de resposta do MOC x frequência de modulação da luz.....	56
Figura 6.2: Curva de resposta em função da potência de luz incidente do MOC.....	58

Figura 6.3: Curva de resposta em função da potência de luz incidente do B&K.....	58
Figura 6.4: Espectros de folha vegetal obtidos com o MOC e com a célula B&K.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Casos limites do efeito fotoacústico.....	27
Tabela 2: Resposta do MOC x variação da potência da luz incidente na amostra.....	57
Tabela 3: Resposta da célula B&K x variação da potência da luz incidente na amostra.....	57
Tabela 4: Ruídos gerais, NEP e relação sinal máximo/ruído geral do MOC e B&K.....	59
Tabela 5: Contribuições dos diversos tipos de ruídos no MOC.....	59

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 GENERALIDADES SOBRE TÉCNICAS FOTOTÉRMICAS	14
2.1 O EFEITO FOTOACÚSTICO	14
2.1.1 Histórico	14
2.1.2 Geração do sinal fotoacústico	15
2.1.3 Vantagens da espectroscopia fotoacústica	20
2.1.4 Equação geral e condições de contorno	20
2.1.5 Aplicações da Técnica Fotoacústica	26
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS CALORIMÉTRICOS	27
2.2.1 Método Fototérmico	28
2.2.2 Método da Refração	28
2.2.3 Método Fotoacústico	29
3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MICROFONE ÓPTICO	31
3.3 FUNCIONAMENTO DO MICROFONE ÓPTICO CONVENCIONAL	31
3.3.1 Elemento sensível do microfone óptico	31
3.3.2 Célula fotoacústica do MO	32
3.3.3 Funcionamento do MO	32
3.4 PRINCIPAIS LIMITAÇÕES DO MO CONVENCIONAL.....	33
4 ESTRUTURA DO MICROFONE ÓPTICO COMPACTO	35
4.1 A BASE DO MICROFONE ÓPTICO COMPACTO (MOC)	35
4.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM <i>PICK-UP</i>	36
5 METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DO MOC	41
5.1 APARATO EXPERIMENTAL	41
5.1.1 Princípio de funcionamento do espectrômetro fotoacústico	41
5.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO MOC	44
5.2.1 Elemento Sensível	44
5.2.2 Características do pick-up e esquema de ligação	48

5.2.3 Características do amplificador	50
5.2.4 Características da fonte do laser	51
5.3 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MOC	52
5.3.1 Parâmetros Básicos	52
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
6.1 CURVA DE SINAL X FREQUÊNCIA DE MODULAÇÃO	56
6.2 CURVA DE RESPOSTA EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA DA LUZ MODULADA ...	56
6.2.1 Determinação do “Noise Equivalent Power” (NEP)	59
6.2.2 Medidas das contribuições para o ruído geral	59
6.3 ESPECTROS DE FOLHA VEGETAL	60
6.4 DISCUSSÃO	60
7 CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos dois séculos a ciência tem avançado, principalmente, em função da maior compreensão sobre como a matéria reage à radiação. A espectroscopia é o termo geralmente usado para definir o estudo da interação entre a energia eletromagnética e a matéria. A Espectroscopia Óptica Convencional trabalha com radiação na faixa de comprimento de onda que vai desde o infravermelho até os raios-X e, devido sua versatilidade e natureza não destrutiva, permanece como ferramenta de relevante importância na investigação das propriedades da matéria. Suas duas principais categorias são a espectroscopia de transmissão, que envolve o estudo dos fótons que atravessam a matéria, e a espectroscopia de reflexão ou desvio, que se atem à energia que sofre desvio ou foi refletida pela amostra. Pode-se dizer que, quase todas as técnicas de espectroscopia óptica convencional estão enquadradas nessas duas categorias. Apesar do elevado potencial que esta técnica tem demonstrado, ela é limitada pelo fato de não permitir a detecção e análise da energia diretamente absorvida ao interagir com o material. Por outro lado, existe uma classe de materiais cuja investigação por meio da espectroscopia de transmissão ou reflexão é impossível de se realizar, como por exemplo, materiais transparentes que apresentam absorções tão fracas que a alteração do feixe transmitido é praticamente imperceptível. Também há o caso das amostras opacas com dimensões que excedem o poder de penetração dos fótons, não havendo, assim, luz transmitida. Tais tipos de amostra, geralmente, também não permitem a investigação por reflexão.

A partir da década de 70 passou a ocorrer o desenvolvimento de outra maneira de investigação da interação entre radiação e matéria, que é baseada na medida direta da energia absorvida pelo material sob a incidência de um feixe de luz. Esta nova técnica, denominada Fotoacústica, surgiu a partir de um fenômeno que foi descoberto por Alexandre Graham Bell em 1880. Ela consiste na medida do efeito acústico produzido no gás rente a superfície da amostra que sofre aquecimento intermitentemente quando ela absorve o feixe monocromático de luz modulada. Ao longo dos anos, a fotoacústica tem se mostrado muito mais versátil que a espectroscopia convencional exatamente, porque ela tornou possível o estudo de vários casos que, até então, não eram contemplados. No entanto, seu aperfeiçoamento estava dependendo do desenvolvimento de microfones com sensibilidade compatível à

exigida pela natureza do fenômeno. Logo, muitos são os esforços na elaboração de dispositivos de detecção de alta sensibilidade. Nesse sentido, no início da década de noventa foi proposto um microfone óptico (DE PAULA, 1992) que demonstrou ser altamente sensível. Neste trabalho, será apresentada a avaliação feita de uma alternativa para a construção do microfone óptico que visa à compactação e à redução de custo.

2 GENERALIDADES SOBRE TÉCNICAS FOTOTÉRMICAS

2.1 O EFEITO FOTOACÚSTICO

Considerando que a origem do variado número de técnicas fototérmicas atualmente empregadas é o efeito fotoacústico, serão abordados a seguir os fundamentos de tal efeito.

2.1.1 Histórico

Alexandre Graham Bell descobriu acidentalmente o efeito fotoacústico em 1880 quando trabalhava no desenvolvimento de aparelho de comunicação por luz (BELL, 1880). Ele observou que um som audível era produzido no ar ao redor de um sólido dentro de uma célula, no qual ocorria incidência de luz solar modulada, sendo o som captado através de um tubo acústico conectado à célula. Bell constatou que o nível do sinal de áudio produzido dependia da natureza da substância, ou seja, que amostras absorvedoras produziam sinais acústicos mais elevados. Isto o levou a perceber uma maneira de medir o espectro de absorção da amostra. Na ocasião, duas hipóteses foram formuladas para explicar o fenômeno para amostras sólidas. Rayleigh, concordando com Bell, propôs que o som era gerado pela expansão e contração da amostra, em virtude de seu aquecimento intermitente. Já Mercadier e Preece, consideraram que o sinal acústico resultava de uma variação periódica no volume da camada de gás imediatamente próxima à superfície do sólido, devido ao aquecimento e resfriamento alternados (ROSENCWAIG e GERSHO, 1976). Em 1881 Bell e Summer Tainter realizaram estudos sobre o efeito fotoacústico em líquidos e gases (BELL, 1881). No mesmo ano, Tyndall e Roentgen também realizaram pesquisas sobre o efeito fotoacústico em gases (TYNDALL, 1881; ROENTGEN, 1881).

A realização de experimentos com o efeito fotoacústico aguardou o desenvolvimento de microfones com sensibilidade suficiente para captar sinais acústicos tênues. A primeira aplicação foi feita ao estudo de absorção de gases, no final da década de 30, com o objetivo de analisar concentração de misturas gasosas (VIENGEROV, 1938; PFUND, 1939). Após a Segunda Guerra, o fofone, (como era denominado) foi empregado na espectroscopia de gases no infravermelho, bem como para estudar processos de desexcitação e transferência de energia. Porém, com o surgimento de técnicas mais precisas na década de 50, o uso do fofone em espectroscopia perdeu interesse, sendo retomado quando surgiram as fontes de

laser. No entanto, ao contrário do que seria esperado, o efeito fotoacústico em sólidos passou a ser investigado somente a partir de 1973. Até então, as pesquisas utilizando o efeito fotoacústico foram somente com amostras gasosas. Na mesma época Parker (PARKER, 1973) mostrou que o efeito térmico supera em muito a vibração mecânica da amostra. Em 1976, Rosencwaig e Gersho apresentaram a teoria do efeito fotoacústico em sólidos, o que permitiu as mais variadas aplicações da técnica, tais como espectroscopia de absorção numa larga faixa de comprimentos de onda, estudo de propriedades térmicas e elásticas, de reações químicas, de processos radiativos, de ressonância magnética, de eficiência quântica, de superfície, de espessura de camadas e de microscopia, sendo aplicável a todos os materiais inorgânicos como também em materiais orgânicos (ROSENCWAIG, 1980; ROSENCWAIG e GERSHO, 1976; KING e KIRKBRIGHT, 1976).

2.1.2 Geração do sinal fotoacústico

Na geração do sinal fotoacústico distinguem-se dois fenômenos físicos importantes: a absorção óptica e a difusão térmica.

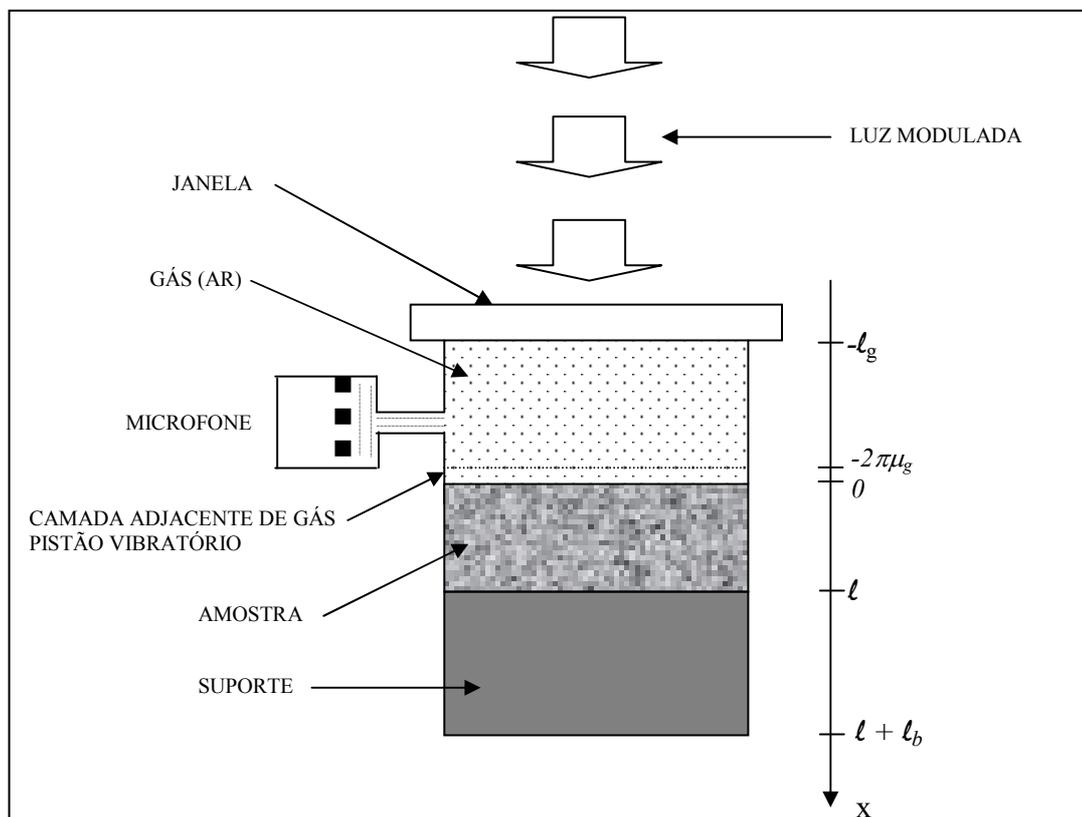


Figura 2.1: Esquema de uma célula fotoacústica

O efeito fotoacústico é devido à absorção intermitente de luz modulada por uma amostra contida numa célula fechada. A luz absorvida produz uma oscilação térmica na superfície da amostra que, em contato com o gás, gera um sinal acústico (ROSENCWAIG, 1980). A figura 2.1 mostra esquematicamente a célula fotoacústica. Nesta, uma amostra, que está sobre um suporte, recebe a luz modulada através da janela que encerra uma porção de gás (geralmente o ar) em contato com a amostra. A amostra sofre um aquecimento periódico e a fina camada de gás adjacente à superfície da amostra expande-se e contrai-se periodicamente, simulando um pistão vibratório, gerando um sinal acústico detectado por um microfone.

2.1.2.1 Absorção Óptica

A luz modulada que incide sobre a amostra não é absorvida totalmente na superfície, mas gradualmente à medida que penetra no material. As moléculas deste, interagem com os fótons que são absorvidos, e a intensidade do feixe diminui exponencialmente. Um parâmetro importante definido nesta questão é o comprimento de absorção óptica (ℓ_β), ou seja, a distância que o feixe de luz penetra na amostra até ter sua intensidade inicial reduzida a $1/e$ ($e=2,718281\dots$). Isto significa, aproximadamente, 67% da luz incidente interagindo com a amostra. Na figura 2.2 temos o comportamento ℓ_β nos casos de amostras opaca, absorvedora e transparente.

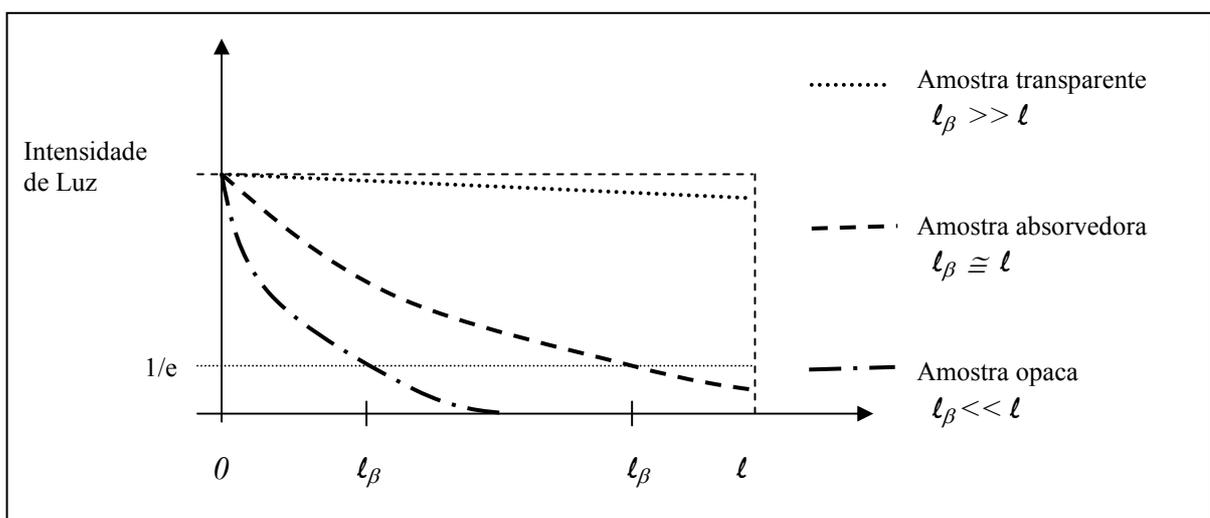


Figura 2.2: Perfis de absorção óptica de três classes distintas de amostras; ℓ_β é o comprimento de absorção óptica e ℓ é a espessura da amostra.

No caso da amostra opaca, ℓ_β é bem menor que a espessura da amostra, enquanto que na absorvedora o valor de ℓ_β é próximo da espessura da amostra. Já na transparente ℓ_β é muito maior que ℓ .

A geração de calor em um ponto depende da luz ali incidente. Assim, o calor será mais intenso próximo à superfície da amostra. A onda eletromagnética ao interagir com uma molécula excita um estado eletrônico, dependendo de sua energia, ou excita um estado de vibração. No caso de ocorrer excitação eletrônica, a energia eletromagnética absorvida neste processo é rapidamente devolvida na forma de um fóton (luminescência). Outro processo que pode ocorrer é uma reação fotoquímica estimulada. Quando não se dá nenhum dos fenômenos anteriores, a energia absorvida é transferida para os estados vibracionais da molécula. Neste caso, há um aumento da temperatura em um ponto da amostra (PESSOA JR, 1985). Em cada ponto da amostra ocorrem dois processos de transferência de energia térmica. Há uma transmissão dissipativa, por condução, de calor para o restante da amostra, sendo este fenômeno denominado difusão térmica. Também ocorre o fenômeno da expansão térmica, havendo a geração de ondas elásticas que se propagam na amostra.

2.1.2.2 Difusão Térmica

A velocidade com que o calor se espalha numa amostra é definida pelo parâmetro difusividade térmica α . Este parâmetro distingue-se da condutividade térmica K , que mede o fluxo de calor em função do gradiente de temperatura. A difusividade térmica α está relacionada a processos transientes ou periódicos de transmissão de calor, enquanto que a condutividade térmica descreve processos contínuos (estacionários). Assim, conhecendo-se somente a condutividade térmica de um material, não é possível definir a taxa de difusão, uma vez que um mesmo fluxo pode ocorrer para quantidades distintas de calor difundindo-se a velocidades diferentes. Porém, pode-se expressar a difusão térmica em função da condutividade térmica, definindo-se a quantidade de calor armazenada por unidade de volume em uma dada temperatura, ou seja, $\rho.c_p$, o produto da densidade pelo calor específico da amostra (PESSOA JR, 1985). Desta forma, pode-se representar α em termos de K como:

$$\alpha = \frac{K}{\rho c_p} \quad , \quad (1)$$

2.1.2.3 Comprimento de Difusão Térmica (μ)

Quando um ponto da amostra é aquecido, seu calor difunde-se para outros pontos da amostra. Estes sofrem um aumento e uma diminuição de temperatura semelhante a um pulso de calor que se propaga pela amostra. Todos os pontos da amostra produzem calor periodicamente, dentro do comprimento de absorção óptica ℓ_β . A difusão a partir de um ponto, ocorre em ciclos que correspondem à frequência de modulação da luz, $f = \omega/2\pi$. A amplitude da oscilação térmica, observada na superfície da amostra, depende da sua distância ao ponto onde o calor foi gerado, bem como da frequência de modulação da luz. O comprimento de difusão térmica μ é definido como sendo a distância na qual a amplitude de oscilação térmica transmitida corresponde a $1/e$ do valor inicial. Essa grandeza especifica a atenuação da oscilação térmica e é expressa por:

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad , \quad (2)$$

onde, ω é a frequência de modulação da luz incidente.

Para o efeito fotoacústico, somente a luz absorvida dentro de uma profundidade $2\pi\mu_s$ na amostra contribui significativamente para a oscilação de temperatura na interface com o gás. Por outro lado, somente a camada de gás de comprimento $2\pi\mu_g$ reage termicamente à oscilação de temperatura produzida na superfície da amostra e, assim, contribui para a geração do sinal fotoacústico (ROSENCWAIG, 1980). O fato de μ depender da frequência de modulação ω (equação 2) torna possível a seleção do sinal de camadas cada vez mais superficiais, pelo aumento da frequência ω , realizando um perfil de profundidade. Assim, para uma amostra que tenha duas camadas em espectros distintos, pode-se obter o espectro composto e o espectro isolado da camada superior, pela variação do valor de ω . Este recurso, no entanto, não permite obter, isoladamente, o espectro da camada inferior. A figura 2.3 ilustra o exposto anteriormente (PESSOA JR, 1985). Há, porém, outra forma de trabalhar o perfil de profundidade, que é por meio do estudo da fase do sinal fotoacústico, uma vez que tanto a intensidade quanto a fase dependem da distância da superfície da amostra ao ponto onde a luz foi absorvida, como será visto posteriormente.

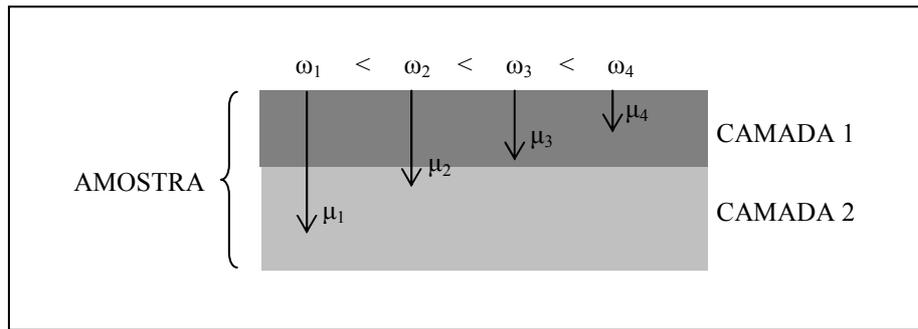


Figura 2.3: Perfil de profundidade por variação da frequência. O aumento de ω diminui o comprimento de difusão térmica μ , efetuando a seleção progressiva do sinal da camada 1.

A amostra pode ser classificada pelo seu comportamento térmico em função de sua espessura ℓ :

- a) Se $\ell \gg 2\pi\mu_s$ – amostra termicamente grossa;
- b) Se $\ell \ll \mu_s$ – amostra termicamente fina.

A amostra termicamente grossa permite que as propriedades térmicas do suporte sejam desprezadas para a geração do sinal fotoacústico. No caso de uma amostra termicamente fina, a atenuação da oscilação térmica é insignificante qualquer que seja o ponto onde o calor foi produzido na amostra (PESSOA JR, 1985).

2.1.2.4 Pistão Acústico

O calor gerado na amostra se propaga até a superfície que está em contato com o gás. Este recebe, praticamente sem perdas e periodicamente, o calor transferido pela amostra. No gás a difusão é rápida, mas a oscilação térmica é atenuada para $1/e$ do seu valor inicial numa distância, em geral, menor que um milímetro ($\mu_{\text{ar}} = 540\mu\text{m}$) para uma frequência de modulação da luz em torno de 25Hz. Assim, somente a camada imediatamente próxima à superfície da amostra sofre periódicas expansões e contrações térmicas, simulando um pistão de gás que comprime o restante do gás gerando onda de pressão que é transmitida até o microfone. Mais adiante veremos que a intensidade do sinal fotoacústico decresce com o aumento da frequência de modulação, dificultando a espectroscopia fotoacústica para elevados valores de ω . Contudo, existe um valor ω em que ocorre a ressonância do sinal acústico no espaço contido entre a amostra e a janela. Esta ressonância, denominada

ressonância de Helmholtz, amplifica consideravelmente o sinal fotoacústico, sendo muito utilizada em estudos com gases (ROSENCWAIG, 1980).

2.1.3 Vantagens da espectroscopia fotoacústica

As vantagens que a espectroscopia fotoacústica apresenta sobre a espectroscopia ótica convencional são:

- a) Consiste em uma medida direta da absorção, não sendo interferida pela luz transmitida, refletida ou espalhada, mesmo nos casos de baixa absorção;
- b) Permite obter o espectro de amostras opticamente opacas;
- c) Permite a análise dos perfis de profundidade (tomografia) das amostras;
- d) Pode ser aplicada em uma ampla faixa do espectro eletromagnético sem ser necessária a substituição do detector;
- e) É uma técnica não destrutiva que pode ser utilizada na análise de materiais orgânicos e inorgânicos, sendo que a mesma amostra pode ser utilizada mais de uma vez;
- f) Pode-se determinar as propriedades térmicas da amostra, pois a fotoacústica é uma espécie de calorimetria;
- g) Fornece informações da amostra tanto pela amplitude como pela fase do sinal fotoacústico.

2.1.4 Equação geral e condições de contorno

2.1.4.1 A Teoria R-G

Formulada por Rosencwaig e Gersho, em 1976, considera o sinal fotoacústico sendo gerado pela transferência periódica de calor da amostra para o gás, formando neste uma espécie de pistão vibratório que produz o som.

A figura 2.1 ilustra a situação experimental a ser analisada. Será considerado o caso em que a incidência de luz ocorre apenas pela dianteira da amostra de comprimento l_s , que está sobre um suporte de tamanho l_b . A coluna de gás dentro da célula tem comprimento l_g . Considerando que a intensidade da luz modulada que incide na amostra seja dada por:

$$I = I_0 e^{j\omega t} \quad , \quad (3)$$

onde, I_0 é a intensidade da radiação incidente e ω sua frequência de modulação.

Antes de prosseguir serão feitas algumas definições. O subscrito i em cada parâmetro pode assumir índices g , s , e b , respectivamente, ao gás, a amostra e ao suporte. Temos:

$K_i \rightarrow$ condutividade térmica (cal/cm.s.°C)

$\rho_i \rightarrow$ densidade (g/cm³)

$c_{pi} \rightarrow$ calor específico à pressão constante (cal/g.°C)

$\alpha_i = K_i / \rho_i \cdot c_i \rightarrow$ difusividade térmica (cm² /s)

$a_i = (\omega/2 \alpha_i)^{1/2} \rightarrow$ coeficiente de difusão térmica (cm⁻¹)

$\sigma_i = (1+i)a_i \rightarrow$ coeficiente complexo de difusão térmica (cm⁻¹)

$\mu_i = 1/a_i \rightarrow$ comprimento de difusão térmica (cm)

$\beta_i \rightarrow$ coeficiente de absorção óptica (cm⁻¹)

$\ell_{\beta i} = 1/\beta_i \rightarrow$ comprimento de absorção óptica (cm)

2.1.4.2 Equação de Difusão Térmica

Utilizando a equação de difusão térmica em uma dimensão para descrever os fenômenos relevantes que ocorrem no interior da célula, temos:

$$\frac{\partial^2 \theta(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t} + f(x,t) = 0 \quad , \quad (4)$$

onde, $\theta(x,t)$ é a temperatura.

Sendo definido $f(x,t) = \frac{1}{K} S(x,t)$, onde $S(x,t)$ é a taxa de geração de calor por unidade de tempo. A expressão para a intensidade de luz absorvida homogeneamente numa amostra até um ponto x é fornecida pela equação de Beer:

$$I(x) = I_0 (1 - e^{-\beta x}) \quad . \quad (5)$$

No caso em consideração em que a geração de calor ocorre devido a absorção da radiação incidente pela face frontal da amostra, temos que a componente espacial de $f(x,t)$ é dada por:

$$f(x) \cong \frac{1}{K_s} S(x) = \frac{1}{K_s} \frac{d}{dx} I(x) = \frac{\beta}{K_s} I_0 e^{-\beta x}. \quad (6)$$

Aplicando a equação 4 na interface amostra-gás, na qual as condições de contorno, segundo Rosencwaig e Gersho são:

$$\theta_s = \theta_g, \quad (7)$$

$$K_s \frac{d\theta_s}{dx} = K_g \frac{d\theta_g}{dx}. \quad (8)$$

As condições de contorno dadas pelas equações 7 e 8 estão relacionadas com a igualdade de temperatura e a continuidade do fluxo de calor na interface amostra-gás.

A absorção de luz e a oscilação térmica têm, para o caso considerado, uma dependência temporal conforme a parte real de $e^{j\omega t}$. Assim, a solução da equação 4 fornece a expressão para a oscilação de temperatura na câmara fotoacústica, ou seja:

$$\theta_g(x,t) = \theta(0) e^{-a_g|x|} e^{j(\omega t + \phi)} \quad (9)$$

onde, $a_g = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_g}}$, é o coeficiente de difusão térmica do gás, como visto anteriormente.

O fator θ_0 representa a amplitude da temperatura em $x = 0$, ou seja, na interface amostra-gás. Aplicando-se o método das funções de Green (BUTKOV, 1978), obtém-se a solução geral da componente espacial de $\theta(x,t)$ em $x = 0$, dada por:

$$\theta(0) = \frac{\beta I_0}{2K_s(\beta^2 - \sigma_s^2)} \cdot \frac{(b+1)(r-1)e^{\sigma_s \ell} - (b-1)(r+1)e^{-\sigma_s \ell} + 2(b-r)e^{-\beta \ell}}{(g+1)(b+1)e^{\sigma_s \ell} - (g-1)(b-1)e^{-\sigma_s \ell}} \quad (10)$$

onde, $r \equiv \frac{\beta}{\sigma_s}$; $b \equiv \frac{K_b \sigma_b}{K_s \sigma_s}$; $g \equiv \frac{K_g \sigma_g}{K_s \sigma_s}$.

2.1.4.3 Sinal Acústico

O sinal fotoacústico resulta principalmente da transferência periódica de calor da amostra para o gás. Assim, a intensidade da oscilação periódica de pressão é proporcional à quantidade de calor oriunda da amostra. A temperatura no gás também oscila no tempo e depende da distância à interface amostra-gás (equação 9).

O pistão vibratório é formado pela camada de gás entre $x = 0$ e $x = -2\pi\mu_g$, considerando que além desta faixa a variação de temperatura torna-se desprezível. Supondo o gás ideal, obtém-se (ROSENCWAIG e GERSHO, 1976) a parte real para a variação de pressão de:

$$\vec{\delta p}(t) = \delta_p e^{j(\omega t + \varphi_F)} \quad , \quad (11)$$

onde,

$$\delta_p = \frac{\gamma p_0 \theta(0)}{\sqrt{2} \ell_g a_g T_0}$$

é a amplitude da variação de pressão no gás e $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ é a razão entre os calores específicos, p_0

é a pressão estática no gás e T_0 é a temperatura média na interface amostra-gás.

Pode-se notar que o sinal fotoacústico é incrementado quando se diminui o comprimento da coluna de gás (ℓ_g), e a temperatura T_0 . Pode-se, então, representar essa variação de pressão, que é o próprio efeito fotoacústico, em um diagrama de fasores no plano complexo, conforme ilustra a figura 2.4.

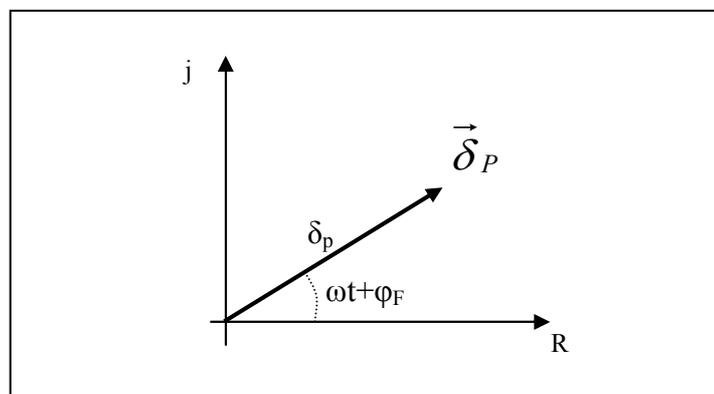


Figura 2.4: Representação fasorial da variação de pressão. φ_F é a fase e ω a frequência de modulação.

A detecção dessa variação de pressão é realizada por um microfone sensível, sendo uma primeira medida do sinal fotoacústico. A amplitude do sinal dependerá das especificações do microfone, ou seja, sua razão sinal eletrônico/amplitude de pressão, normalmente especificado em milivolts/pascal. Esse sinal pode ser visualizado, após amplificação, na tela de um osciloscópio. Entretanto, devido á baixa amplitude desse sinal, ele é muito suscetível às fontes de ruídos eletrônicos, acústicos, vibrações, etc., o que requer uma detecção síncrona com a frequência de modulação. Para a realização dessa detecção, utiliza-se um modulador (*chopper*) que além de fornecer luz modulada incidente na amostra, gera também um sinal de referência (onda quadrada), a partir da interrupção intermitente da luz de um diodo LED incidente em um fotodetector. Normalmente, haverá uma defasagem entre esse sinal e o sinal fotoacústico, e essa defasagem é considerada como a fase Φ_F do sinal fotoacústico. Observa-se, portanto, que a fase do sinal fotoacústico é uma grandeza relativa, dependente da particular montagem do aparato experimental. Contudo, a diferença de fase entre dois sinais, desde que detectados a partir de uma mesma montagem, é uma grandeza absoluta.

Para a medida prática do sinal fotoacústico, tanto o sinal proveniente do microfone quanto o sinal da referência, são inseridos em um amplificador síncrono (sintonizado) (*lock-in*). Através de uma combinação (produto) de ambos os sinais, realizada pelas suas características eletrônicas, o amplificador fornecerá em sua saída um nível DC, correspondente ao módulo do sinal fotoacústico e um valor angular, que corresponderá à fase desse sinal. O amplificador também limitará a faixa de frequência de detecção ao valor da frequência de modulação, funcionando como um filtro, o que melhorará significativamente a relação sinal/ruído. O amplificador disponibiliza as informações correspondentes ao módulo do sinal fotoacústico e sua fase na forma de dados digitais.

Conforme foi dito anteriormente, a variação de pressão corresponde ao próprio efeito fotoacústico. Logo temos:

$$\bar{\delta p}(t) = S_F e^{j\Phi_F} e^{j\omega t} = \vec{S}_F e^{j\omega t}, \quad (12)$$

onde,

$$\vec{S}_F = S_F \cdot e^{j\Phi_F}.$$

A equação 12 mostra que o sinal fotoacústico é a componente independente do tempo da equação 11. Desta forma, a representação mais apropriada para o sinal fotoacústico, após

sua detecção no *lock-in*, é a de um vetor fixo no plano xy constituído de uma magnitude e uma fase, conforme mostrado na figura 2.5.

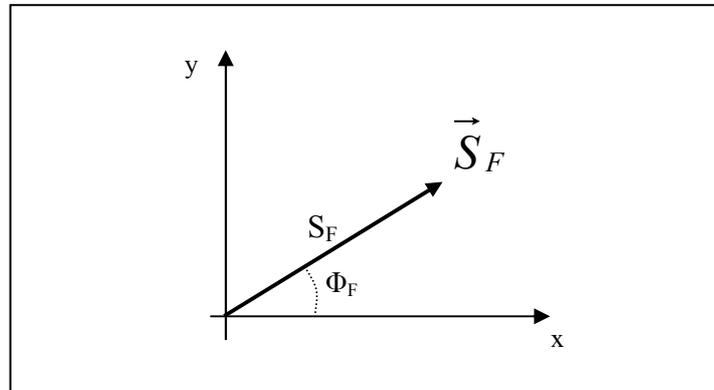


Figura 2.5: Representação vetorial do sinal fotoacústico após a detecção síncrona no lock-in, sendo S_F a amplitude do sinal e Φ_F sua fase.

2.1.4.4 Casos Limites

Pela equação 10 pode-se perceber a complexidade do termo $\theta(0)$. Logo, raramente é utilizada na íntegra. Na prática, o que ocorre é sua simplificação para certos casos limites nos quais as magnitudes dos parâmetros μ_s , l_β e l_s diferem em muitas ordens de grandeza, o que facilita a determinação do sinal fotoacústico. Na tabela 1, têm-se os casos especiais. Quando $l_s \ll \mu_s$, situação na qual a atenuação da oscilação térmica é desprezível, independentemente do ponto da amostra onde foi gerado, temos o caso de amostras termicamente finas. Por outro lado, quando $l_s \gg \mu_s$ (ou convencionalmente $l_s > 2\pi\mu_s$) as amostras são denominadas termicamente grossas e as propriedades térmicas do suporte podem ser desprezadas (PESSOA JR, 1985).

2.1.5 Aplicações da Técnica Fotoacústica

A técnica fotoacústica tem se mostrado bastante versátil, pois se aplica a quase todas as áreas da ciência. As propriedades térmicas da matéria, por exemplo, a difusividade térmica (PESSOA JR *et al.*, 1986) pode ser obtida por meio da fotoacústica.

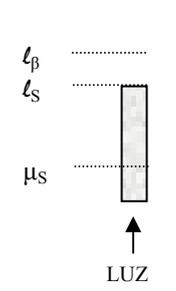
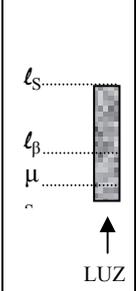
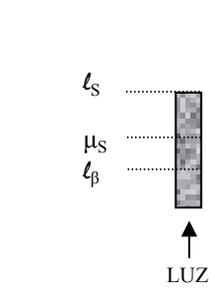
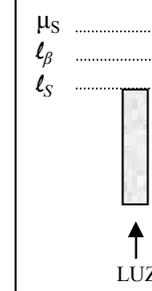
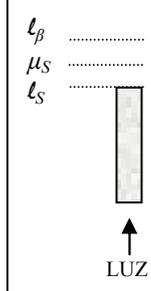
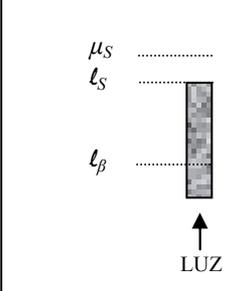
A fotoacústica tem contribuído significativamente em trabalhos de caracterização de células fotovoltaica (FARIA *et al.*, 1986; MELLO *et al.*, 1987).

Na área dos alimentos, foi usada para determinar o teor de umidade contido no amido com espectroscopia na faixa do infravermelho próximo (BELTON e TANNER, 1983). Também foi aplicada ao controle de qualidade de frituras industrializadas (SIVAKESAVA e IRUDAYARAJ, 2000) e na análise da composição de frutas e condimentos a base de *paprika* (pimentão) (VINHA e HAAS, 1997).

A técnica também tem sido empregada de forma versátil e conveniente no estudo das propriedades de certos materiais biológicos, por exemplo, a hemoglobina, na faixa do infravermelho, através da FTIR-PAS – *Fourier-Transformed Infrared Photoacoustic*, o que, anteriormente, era difícil de conseguir com a espectroscopia infravermelha de transmissão (ROCKLEY *et al.*, 1980).

Estudo de uma folha conectada à planta tem sido realizado com o uso da célula fotoacústica aberta, permitindo eliminar o efeito da desidratação que ocorre quando a análise é feita com a folha tendo sido retirada, sendo possível monitorar atividades fotossintéticas (PEREIRA *et al.*, 1992). Outra aplicação da técnica de grande importância foi no monitoramento de efeito de herbicidas em folhas de vegetais (NERY *et al.*, 1987).

Tabela 1: Casos limites do efeito fotoacústico

PROPRIEDADES TÉRMICAS	Termicamente Grosso		Termicamente Fino			
	$\ell_s \gg \mu_s$		$\ell_s \ll \mu_s$			
\vec{S}_F GERAL COM CONDIÇÕES R.G.	$\vec{S}_F = \frac{(Y\omega^{-1/2}e^{-j\pi/4})}{\sigma_s(g+1)} \cdot \int_0^\ell e^{\sigma_s x} f(x) dx$		$\vec{S}_F = \frac{(Y\omega^{-1/2}e^{-j\pi/4})}{\sigma_s(g+b)} \cdot \int_0^\ell f(x) dx$			
\vec{S}_F COM ABSORÇÃO DE BEER	$\vec{S}_F = (Y\omega^{-1/2}e^{-j\pi/4}) \frac{\beta I_0}{2K_s(\beta^2 - \sigma_s^2)} \cdot \frac{(r-1)}{g+1}$		$\vec{S}_F = (Y\omega^{-1/2}e^{-j\pi/4}) \frac{I_0}{\sigma_s K_s(g+b)} \cdot (e^{-\beta\ell} - 1)$			
FASE	$\varphi_F = \arctan(\beta/a_s + 1)$		$\varphi_F = 90^\circ$			
PROP. ÓPTICAS	$\ell_\beta \gg \mu_s$	$\ell_\beta \ll \mu_s$	$\ell_\beta \gg \ell_s$	$\ell_\beta \ll \ell_s$		
\vec{S}_F	$\vec{S}_F = \frac{-YI_0\beta\mu_s^2}{4\sqrt{2}K_s\sqrt{\omega}} \cdot (1+j)$	$\vec{S}_F = \frac{-YI_0\mu_s\sqrt{2}}{4K_s\sqrt{\omega}} \cdot j$	$\vec{S}_F = \frac{-YI_0\beta\ell\mu_b\sqrt{2}}{4K_b\sqrt{\omega}} \cdot j$	$\vec{S}_F = \frac{-YI_0\mu_b\sqrt{2}}{4K_b\sqrt{\omega}} \cdot j$		
FASE	$\varphi_F = 45^\circ$	$\varphi_F = 90^\circ$	$\varphi_F = 90^\circ$	$\varphi_F = 90^\circ$		
DEPENDÊNCIA C/ FREQUÊNCIA	$I_F \propto \omega^{-\frac{3}{2}}$	$I_F \propto \omega^{-1}$	$I_F \propto \omega^{-1}$	$I_F \propto \omega^{-1}$		
DEFINIÇÃO DO ESPECTRO	Resolvido		Saturado			
PROPRIEDADES ÓPTICAS	Transparente	Opaco	Opaco	Transparente	Transparente	Opaco
	$\ell_s \ll \ell_\beta$	$\ell_s \gg \ell_\beta$		$\ell_\beta \ll \mu_s$	$\ell_\beta \gg \mu_s$	
REPRESENTAÇÃO O ESQUEMÁTICA						

A constante Y é dada por:
$$Y = \frac{c_P}{c_V} P_0 \frac{\sqrt{\alpha_g}}{\ell_g T_0}$$

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS CALORIMÉTRICOS

A Fotoacústica Convencional faz parte do conjunto dos métodos calorimétricos, no qual estão incluídos outros, tais como o Fototérmico e a Refração. Assim, convém explicar, ainda que de forma resumida, as principais técnicas de detecção das mudanças dos parâmetros físicos e termodinâmicos, ocasionadas pela absorção de luz na amostra.

2.2.1 Método Fototérmico

A característica principal deste método é a detecção direta da ação térmica ou mecânica das partículas excitadas da amostra na superfície de um elemento sensível apropriado, como por exemplo, um piroelétrico, um piezelétrico ou um bolômetro (ZHAROV e LETOKHOV, 1985).

Quando determinados tipos de cristais são submetidos a trações e compressões mecânicas, sua estrutura cristalina produz uma tensão proporcional à intensidade desta deformação. Este fenômeno é conhecido como efeito piezelétrico direto. A detecção por piezelétrico (HORDVIK e SCHLOSSBERG, 1977; FARROW *et al.*, 1978) envolve a colocação do elemento sensível (cristal PZT) em contato direto com a amostra, a fim de converter em sinal elétrico o calor absorvido na forma de energia dos estados vibracionais do material - efeito termoelástico - (ROSENCWAIG, 1980).

Efeito piroelétrico é definido como a carga elétrica gerada, em determinados materiais, como resposta às variações de temperatura. Materiais piroelétricos são aqueles que apresentam polarização elétrica, cuja magnitude é função da temperatura. Os sensores consistem de uma fatia de material piroelétrico com eletrodos de metal em suas superfícies. Sua resposta é função da derivada da temperatura e, portanto, deve ser utilizado no modo AC. A detecção utilizando elementos piroelétricos (COUFAL, 1984) e (MANDELIS, 1984) consiste no monitoramento da variação da temperatura da amostra pelo seu contato com um sensor.

A utilização de dispositivos fotodetectores de infravermelho de alta sensibilidade (NORDAL e KANSTAD, 1979) para detectar a radiação de calor emanado da amostra constitui outro método que é útil na realização de medidas remotas e nas análises seletivas de gás (ZHAROV e LETOKHOV, 1985).

2.2.2 Método da Refração

Neste método estão incluídas as seguintes técnicas de detecção: Lentes Térmicas, Efeito Miragem e Interferometria.

A Técnica denominada Lentes Térmicas é baseada na mudança do índice de refração que ocorre na amostra, próximo a região onde há o aumento da temperatura devido à absorção de luz modulada intensa, geralmente LASER (GORDON *et al.*, 1965). A variação do índice

de refração é então detectada através de um fotodetector que mede a alteração provocada no foco de um feixe de LASER de prova que atravessa a amostra.

O efeito miragem é decorrente do desvio que o feixe de LASER de prova sofre ao passar rasante à superfície de uma amostra (geralmente sólidos) na qual ocorreu absorção que produz oscilação da temperatura e que altera a densidade do gás rente a superfície. A mudança de densidade repercute sobre o índice de refração (BOCCARA *et al.*, 1980).

A Interferometria (STONE, 1972) é um método utilizado para medir a variação do índice de refração do gás rente a superfície da amostra ou dela mesma (amostra transparente ao LASER de prova). Geralmente, este método consiste em promover a interferência do feixe de LASER de prova com um feixe de LASER de referência, sendo que ambos são originários de um mesmo feixe que sofreu divisão. O feixe de prova sofre mudança de fase devido à variação do índice de refração, gerando a alteração do padrão de interferência sobre um fotodetector. Como exemplo de um microfone que tem seu princípio de funcionamento baseado na interferometria, cita-se o proposto por Park e Diebold em 1987, no qual uma célula fotoacústica foi acoplada a um interferômetro Fabry-Perot, para produzir um microfone sensível (PARK e DIEBOLD, 1987).

2.2.3 Método Fotoacústico

Conforme explanado no capítulo 2, o aquecimento periódico, sofrido por uma amostra absorvedora sob incidência de luz, dá origem às vibrações acústicas no gás encerrado na célula fotoacústica. Essas vibrações podem ser detectadas por meio de microfones sensíveis. Os tipos mais comuns utilizados são: os condensadores, os de eletreto e os piezelétricos.

Microfones condensadores têm seu funcionamento baseado na variação de sua capacitância, devido às pequenas mudanças que ocorrem na distância de separação entre as placas, uma das quais é sensível a pressão da onda sonora incidente. O capacitor é normalmente ligado a uma fonte de tensão contínua através de um resistor (figura 2.6), de forma que a variação da capacitância é convertida em variação de tensão sobre o microfone. A tensão produzida é ampliada em um amplificador de baixo ruído e elevada impedância de entrada. Como exemplo de microfone condensador de alta sensibilidade cita-se o fabricado pela Brüel & Kjær (B & K), modelo 4166, utilizado na célula fotoacústica a ser descrita posteriormente.

O microfone de eletreto comercial é composto basicamente por um diafragma de eletreto metalizado, que apresenta uma densidade de carga superficial permanente, e uma placa de metal separada do diafragma por uma camada de ar. A onda sonora incidente atinge a membrana de eletreto fazendo variar sua distância de separação à placa metálica. Este efeito altera o campo elétrico induzindo cargas nas camadas metálicas o que gera uma diferença de potencial nos seus terminais. Este tipo de microfone apresenta uma sensibilidade da ordem de 10mV/Pa, com a menor variação de pressão detectada correspondendo a uma oscilação de temperatura da ordem de 10^{-5} K (MARQUEZINI *et al.*, 1991). A maior vantagem do microfone de eletreto é o baixo custo (PAIVA e BARJA, 2006). O esquema de ligação do microfone de eletreto é semelhante ao mostrado na figura 2.6.

Já o microfone a cristal piezelétrico, converte as ondas acústicas incidentes diretamente em diferença de potencial.

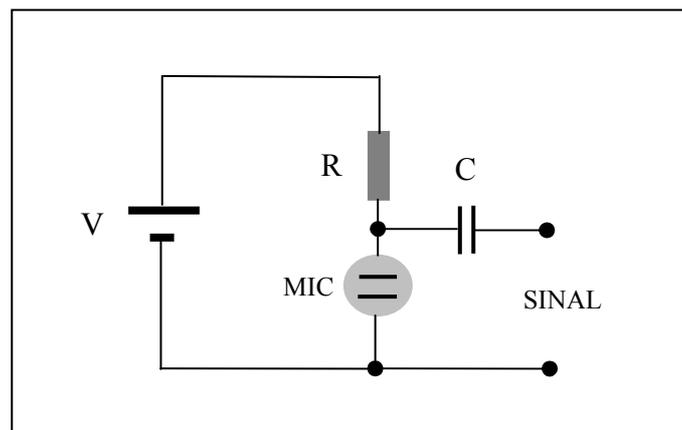


Figura 2.6: Circuito típico de ligação de um microfone condensador.

3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MICROFONE ÓPTICO

3.3 FUNCIONAMENTO DO MICROFONE ÓPTICO CONVENCIONAL

O potencial investigativo da Espectroscopia Fotoacústica é diretamente dependente da sensibilidade do detector empregado. Isto tem motivado a busca pelo desenvolvimento de dispositivos transdutores com desempenho cada vez mais elevado. Pesquisadores têm combinado os mais variados métodos a fim de atingir altos níveis de sensibilidade. Assim, no final da década de 80, foi proposto um dispositivo, denominado microfone óptico (DE PAULA *et al.*, 1988) para a detecção fotoacústica.

3.3.1 Elemento sensível do microfone óptico

O microfone óptico (MO) tem seu funcionamento baseado na deflexão de um feixe de LASER por uma diminuta película espelhada. Inicialmente, esta película possuía a forma de uma gota alongada. Posteriormente, no intuito de diminuir a inércia e aumentar o torque, foi adotada a montagem de uma película fixada no extremo de uma fina fibra de vidro. Este elemento constitui um sistema ressonante (DE PAULA *et al.*, 1992). A figura 3.1 ilustra a configuração do elemento sensível do MO.

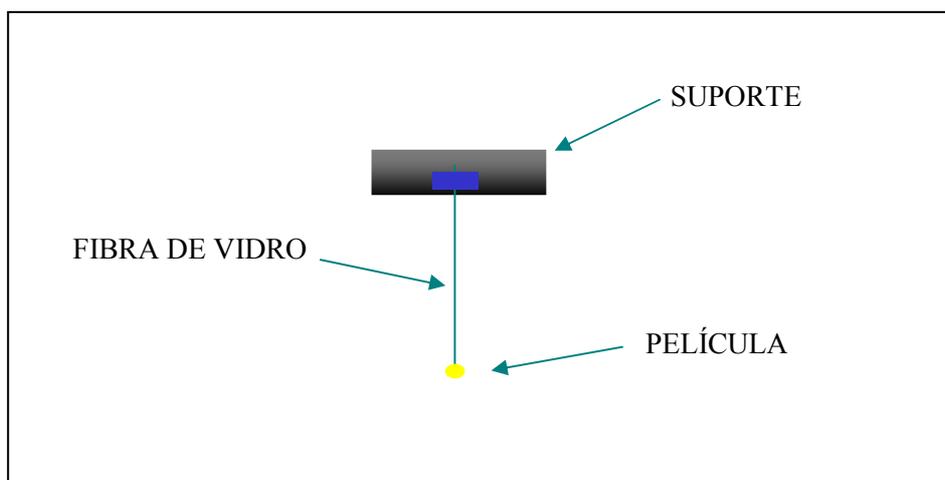


Figura 3.1: Elemento sensível do microfone óptico; película espelhada colada na extremidade de uma fibra de vidro.

3.3.2 Célula fotoacústica do MO

A figura 3.2 ilustra a célula fotoacústica do MO que consiste em um bloco de metal no qual existe uma cavidade para a colocação da amostra. Uma janela de quartzo que permite a incidência de luz na amostra é fixada por uma tampa que sela a câmara fotoacústica. O elemento sensível está posicionado verticalmente para baixo e recebe o sinal fotoacústico através de um duto. Nesta célula a amostra fica na posição vertical. O elemento sensível também é isolado por uma janela de vidro.

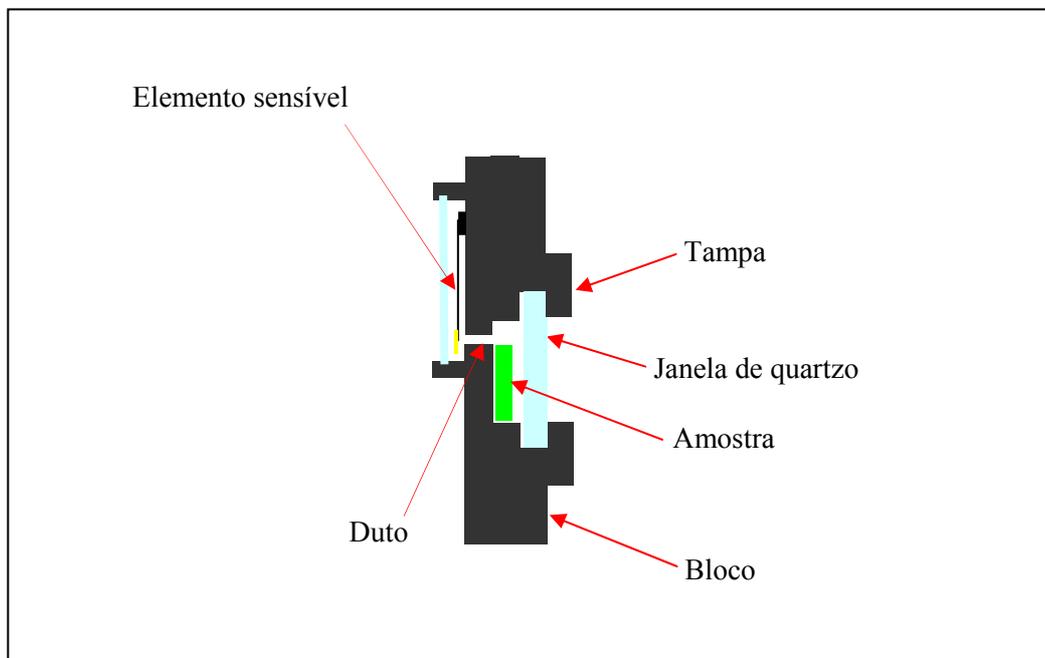


Figura 3.2: Célula fotoacústica do microfone óptico (MO)

3.3.3 Funcionamento do MO

O funcionamento do microfone óptico (MO) baseia-se na deflexão de um feixe de LASER por uma diminuta película espelhada que compõe o elemento sensível do MO. A figura 3.3 esquematiza o MO convencional (DE PAULA *et al.*, 1992).

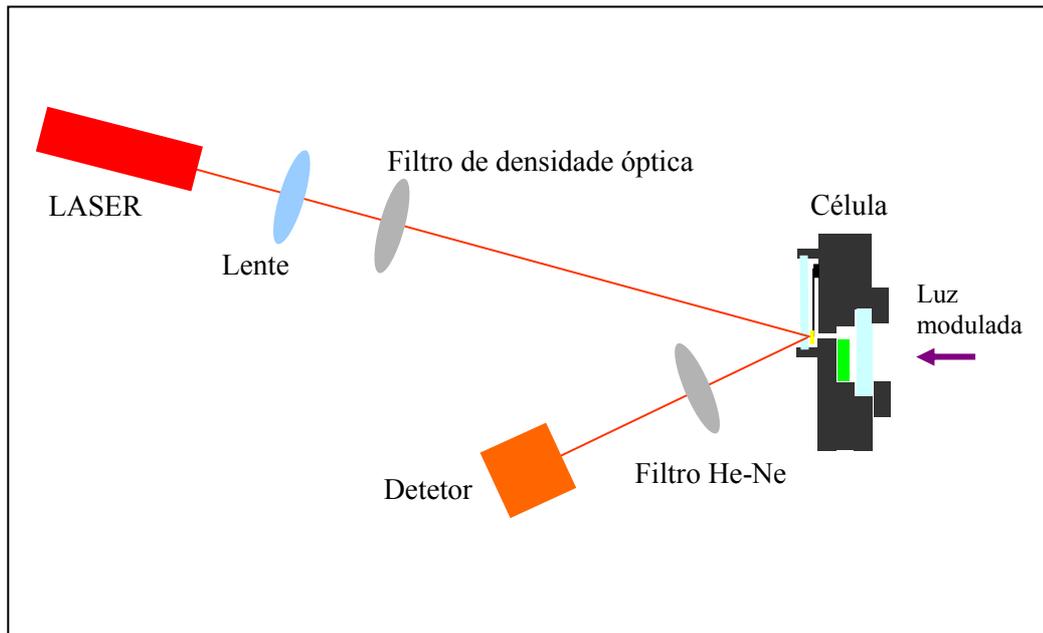


Figura 3.3: Diagrama do MO convencional

O feixe de laser He-Ne, após passar através de uma lente e um filtro de densidade óptica, atinge a película refletora do elemento sensível localizado na célula fotoacústica, sendo refletido na direção do fotodetector de posição, após passar por um filtro de banda He-Ne. A incidência do feixe estático no detector produz um nível de tensão DC. À medida que o sinal acústico na célula provoca o movimento oscilatório da película refletora, o feixe de laser sofre desvio intermitente na sua direção que resulta na variação do ponto de incidência do laser no detector, de forma que em sua saída surge um sinal alternado senoidal com amplitude proporcional ao sinal fotoacústico na célula.

3.4 NECESSIDADES DE APERFEIÇOAMENTO

Conforme mencionado anteriormente, o MO tem demonstrado grande potencial (DE PAULA *et al.*, 2004) e isto motivou a busca pelo aperfeiçoamento. Visando o desenvolvimento de um aparato comercial, a primeira necessidade que surge é a de compactação, pois a montagem apresentada (figura 3.3) não é compacta, em virtude de seus elementos constituintes, por exemplo, o laser He-NE, não possuem tamanho reduzido. A redução de tamanho objetiva a produção de um sistema transportável.

Outro quesito que necessita aperfeiçoamento é que a montagem da figura 3 requer alinhamentos todas as vezes que uma das partes constituintes é movimentada (por exemplo, a célula fotoacústica quando se troca a amostra). Além disto, o sistema fica muito vulnerável às perturbações externas, tais como correntes de ar, sendo muito difícil isolar o sistema como um todo devido seu tamanho.

A fim de tornar o dispositivo mais acessível, a redução de custo é outro ponto importante.

Além dos pontos já citados, há ainda a necessidade de uma configuração da célula fotoacústica que permita a análise de amostras sólidas e líquidas.

Conforme apontado em trabalho anterior (DE PAULA *et al.*, 1992), a utilização de laser a diodo para produzir o feixe de prova em substituição ao laser He-NE, possibilitaria a miniaturização do MO. Nos últimos vinte anos, a pesquisa e a tecnologia de produção de dispositivos óptico-eletrônicos a semicondutores têm avançado significativamente e, aliado ao aumento das indústrias de fabricação de tais dispositivos, estes têm se tornado cada vez mais confiáveis e populares. É caso dos conjuntos ópticos (*pick-up*) empregados nos leitores de *CD players*. No próximo capítulo, será apresentada uma alternativa ao aparato da figura 3.3, baseada na tecnologia atual.

4 ESTRUTURA DO MICROFONE ÓPTICO COMPACTO

4.1 A BASE DO MICROFONE ÓPTICO COMPACTO (MOC)

O MOC utiliza o módulo óptico (laser + detector + lentes) - *PICK-UP* - dos dispositivos de leitura de *Compact Disc* (CD). Este dispositivo possui tamanho reduzido o que permite a compactação. A figura 4.1 ilustra uma típica unidade óptica.

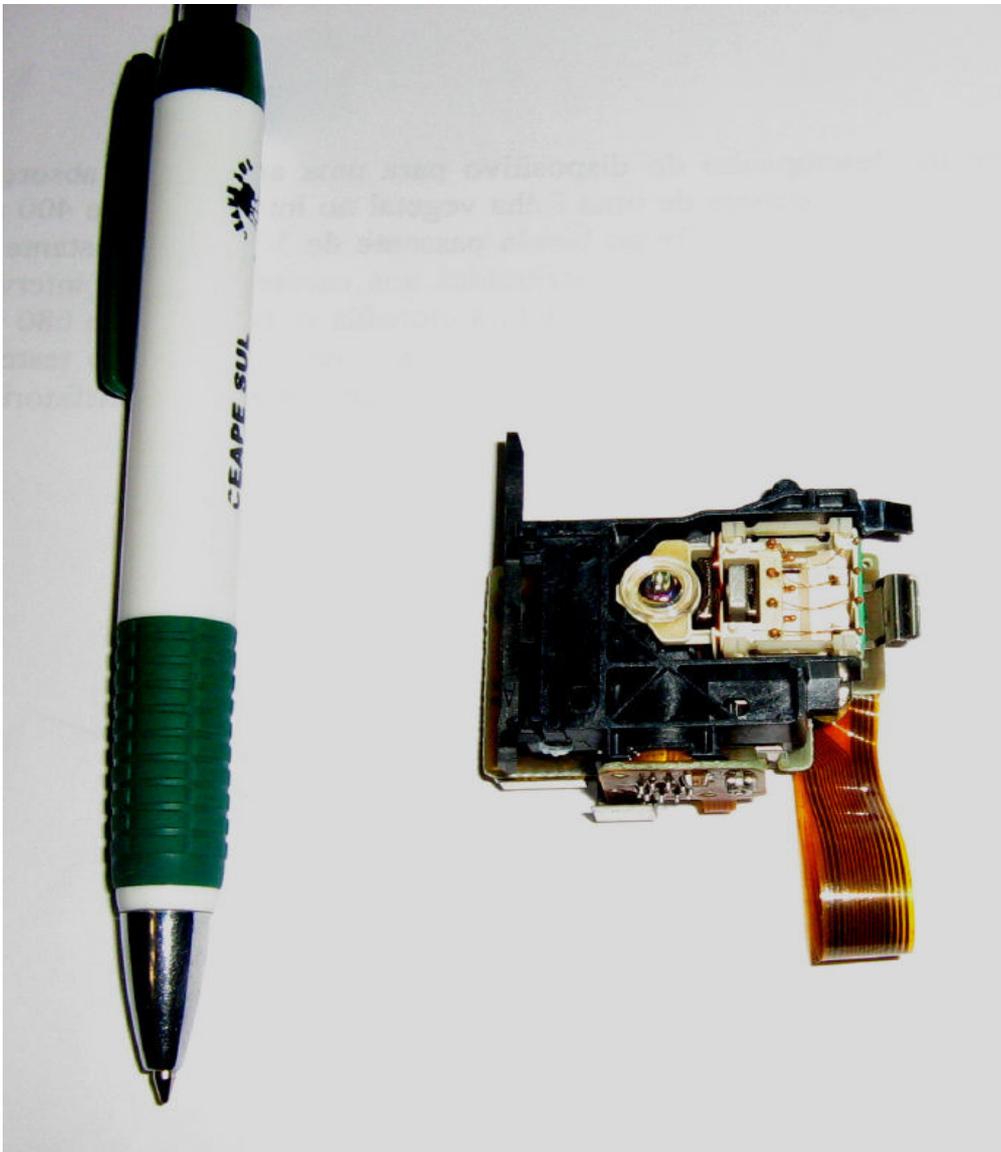


Figura 4.1: Unidade óptica de um leitor de CD

4.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM *PICK-UP*

Conforme esquematizado na figura 4.2, a *pick-up* constitui-se de um LASER semiconductor, um divisor feixe, um espelho (somente alguns dispositivos), uma lente objetiva e um conjunto detector composto de seis detectores formando uma matriz. O feixe de LASER sofre uma difração sendo dividido em três feixes, um principal (mais intenso) e dois laterais (mais fracos). Após a divisão, o feixe triplo é parcialmente refletido pelo divisor de feixe na direção da lente objetiva que focaliza o feixe sobre a superfície do disco compacto (CD). Esta reflete o feixe de volta na direção da lente objetiva até atingir o divisor de feixe que o transmite parcialmente à matriz de detectores. A lente objetiva está montada sobre um sistema acionado magneticamente (conjunto de bobinas e ímãs) que propicia o ajuste de foco e trilhagem (posicionamento do feixe sobre uma trilha). Num equipamento de *CD player* este ajuste ocorre automaticamente. Na matriz de detectores os feixes secundários ficam focalizados nos detectores E e F, enquanto que o feixe principal é focalizado sobre os detectores A, B, C e D.

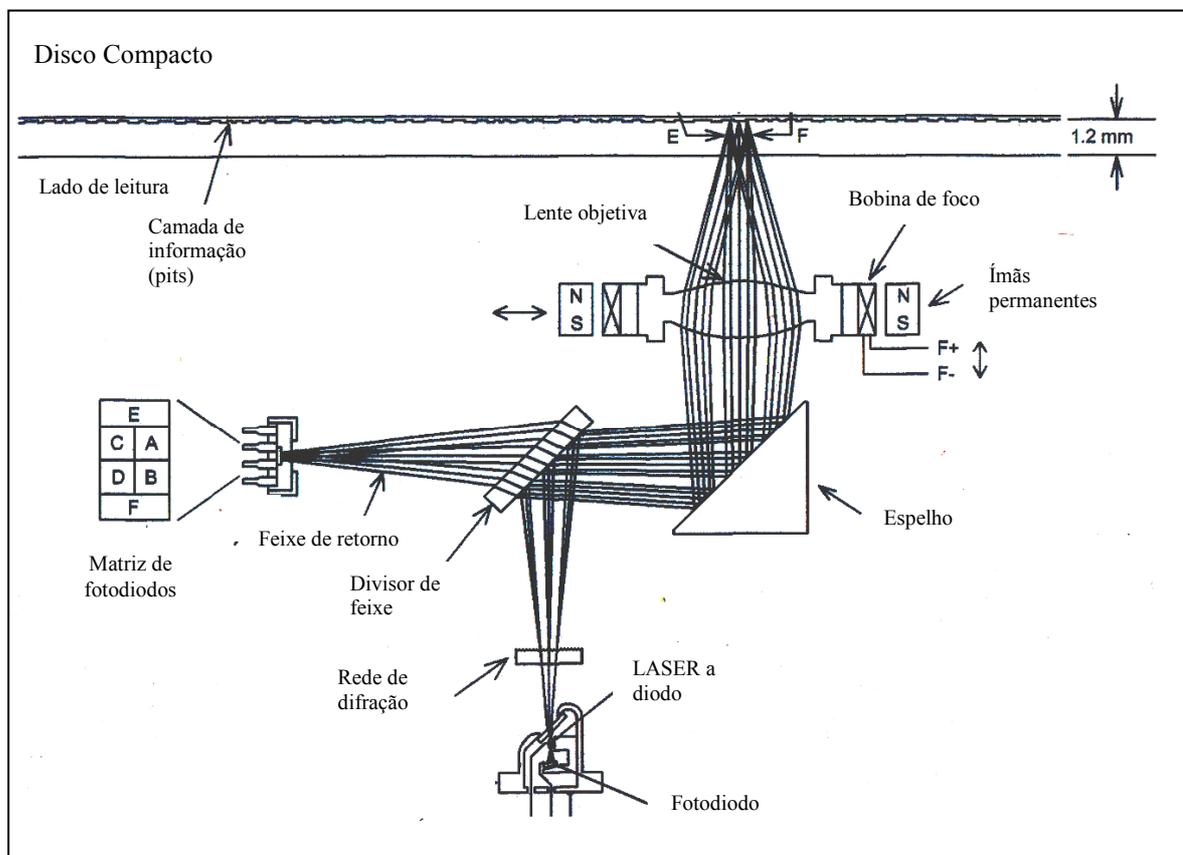


Figura 4.2: Esquema interno de um conjunto óptico (pick-up) de um leitor de disco compacto

Para construção do Microfone Óptico Compacto - MOC fez-se a substituição do laser He-Ne, da lente, do filtro de densidade óptica, do filtro de banda He-Ne e do detector, esquematizados na figura 3.3, pelo *pick-up*. A célula fotoacústica do MOC consiste em um bloco de metal (latão) no qual existe uma cavidade para a colocação do porta-amostra (cadinho) feito de alumínio. A cavidade é encerrada por uma tampa feita de latão que possui uma janela de quartzo para a entrada da luz modulada. Entre a janela de quartzo e o porta-amostra existe um pequeno espaço contendo ar em contato com a amostra, onde se produz o sinal acústico, que é levado até o elemento sensível por meio de um pequeno duto (1mm de diâmetro). A figura 4.3 ilustra a célula fotoacústica do MOC. O *pick-up* é disposto de tal maneira que o feixe de laser principal atinja o centro da película refletora do elemento sensível.

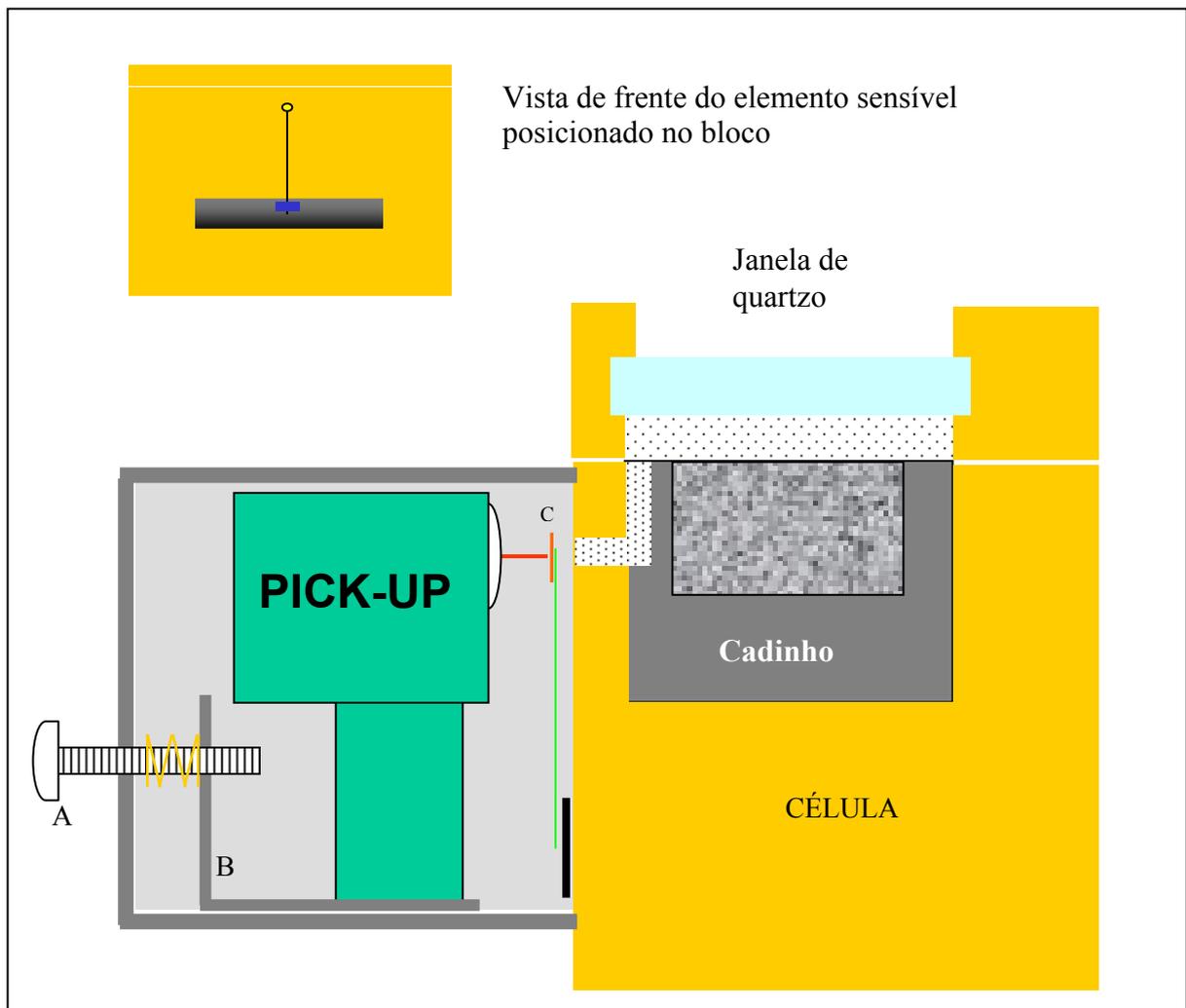


Figura 4.3: Esquema do Microfone Óptico Compacto. A – dispositivo de ajuste de foco, B – mesa transladadora, C – película espelhada.

No MOC todo o conjunto óptico (pick-up + elemento sensível) está encerrado em uma caixa metálica, visando o isolamento acústico e óptico. Além do mais, todo o conjunto é montado sobre um sistema de amortecimento que reduz, consideravelmente, as vibrações. As figuras 4.4a e 4.4b ilustram com fotos o primeiro protótipo construído.

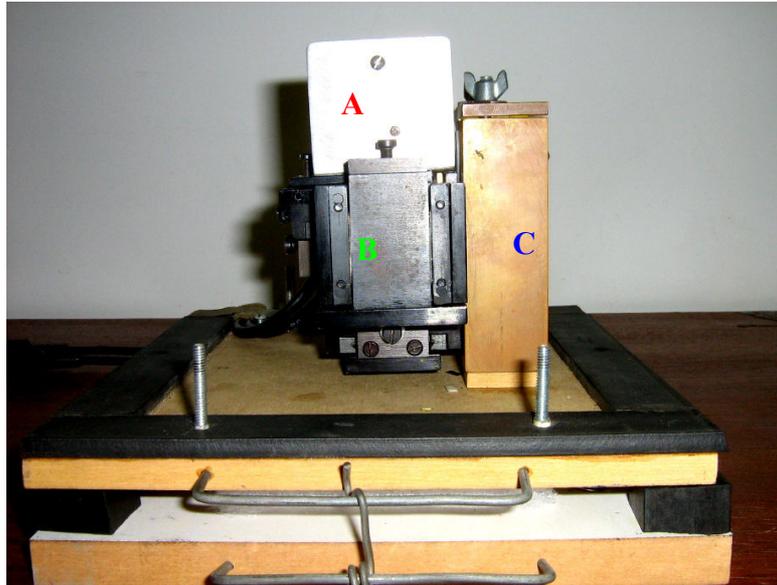


Figura 4.4a: Protótipo nº1 do MOC. **A** – caixa metálica contendo a pick-up, **B** – dispositivo de ajuste de posição, **C** – célula fotoacústica



Figura 4.4b: Protótipo nº1 encerrado numa caixa acrílica. A caneta ao lado evidencia a compactação alcançada com este primeiro modelo.

Este protótipo dispõe de dispositivos que permitem vários graus de ajustes. Conforme os ensaios avançaram, foi possível a eliminação de alguns desses dispositivos, chegando-se a versão do protótipo 2, bem mais simplificada, assemelhando-se à figura 4.3. As figuras 4.5a, 4.5b e 4.5c ilustram com fotos o protótipo 2.

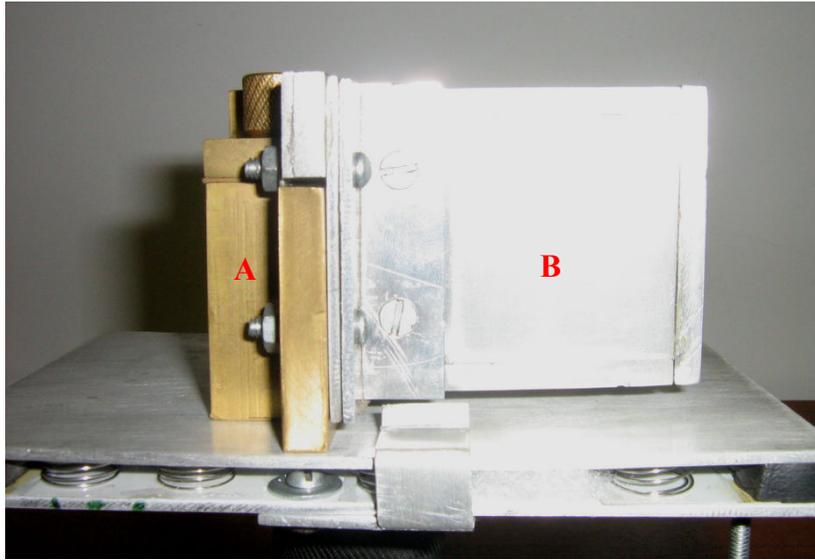


Figura 4.5a: Vista lateral do protótipo nº2. A – célula fotoacústica, B – caixa metálica contendo a *pick-up*

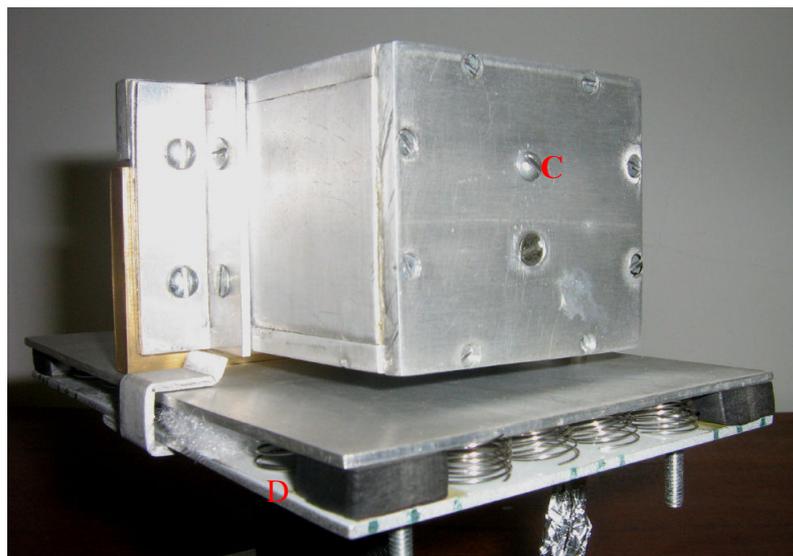


Figura 4.5b: Vista traseira do protótipo nº2 do MOC. C - parafuso de ajuste de foco, D – dispositivo anti-vibração

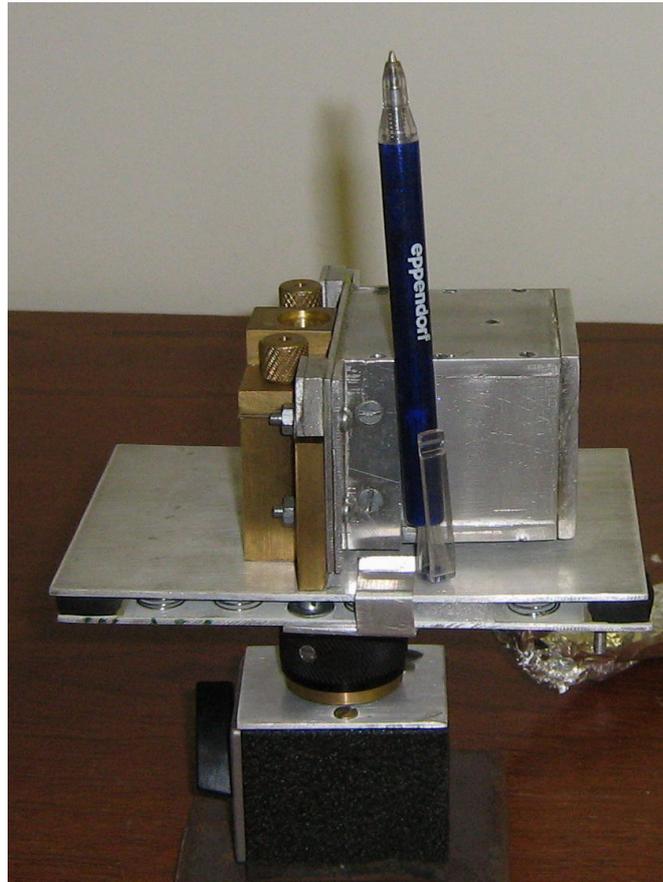


Figura 4.5c: Comparação do protótipo nº2 com o tamanho de uma caneta evidenciando o alto grau de compactação.

O protótipo nº2 (figura 4.5c) mostra o alto grau de compactação alcançado com a utilização do módulo óptico (pick-up). O custo também fica bastante reduzido, pois, em média, uma unidade óptica custa atualmente menos de R\$ 20,00. Ademais, não é necessário alinhar o conjunto óptico todas as vezes que se manipula a célula, sendo, eventualmente, necessário reajustar o foco no início da utilização. A compactação permite que todo sistema seja encapsulado, visando melhorar o isolamento acústico, inclusive, facilitando a utilização de câmara de vácuo.

5 METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DO MOC

5.1 APARATO EXPERIMENTAL

A fase experimental foi desenvolvida integralmente no Laboratório de Espectroscopia Fotoacústica da UFMS em Campo Grande - MS. Os equipamentos utilizados foram: fonte de luz branca com lâmpada de arco de Xe de 1000W (potência elétrica) modelo 6269 da Oriel Corporation, acondicionada em um compartimento Oriel modelo 66021 e alimentada por uma fonte Oriel modelo 68820. A fonte de luz é acoplada ao conjunto monocromador de varredura (com rede de difração de 1200 linhas), modelo 77200 da Oriel Corporation, em cuja saída há um modulador eletromecânico (*chopper*) modelo SR 540 da Stanford Research Systems; filtros de densidade óptica da Oriel Corporation; *lock-in* modelo SR 530 da Stanford Research Systems; programa TSPEC desenvolvido na UFMS; célula fotoacústica com microfone convencional B & K modelo 4166; radiômetro/fotômetro, modelo IL1700, da International Light, com detector de silício modelo SDE033 (fator de calibração $1,248 \times 10^{-2} \text{W/cm}^2$).

5.1.1 Princípio de funcionamento do espectrômetro fotoacústico

A constituição típica de um espectrômetro fotoacústico pode ser esquematizada de acordo com a figura 5.1.

A fonte de luz branca consiste numa torre contendo, geralmente, uma lâmpada de arco de xenônio de alta potência (1000W), sendo a luz produzida canalizada para um monocromador que, por difração, seleciona um requerido comprimento de onda. A luz monocromática na saída do monocromador passa por um *chopper* que provoca a modulação da luz numa frequência desejada. O *chopper* fornece um sinal de sincronismo ao amplificador sintonizado *lock-in*. A luz modulada incide na janela de entrada da célula fotoacústica que produz um sinal senoidal cuja amplitude é diretamente proporcional ao sinal fotoacústico gerado. O sinal senoidal é fornecido ao *lock-in* que disponibiliza em sua saída o módulo e a fase do sinal fotoacústico. Um computador munido de programa específico gera um gráfico (espectro fotoacústico) a partir das informações de módulo e fase do sinal fotoacústico, e o comprimento de onda da luz incidente na célula fotoacústica. O programa também realiza a correção do espectro a fim de compensar a variação na intensidade da luz com o comprimento

de onda, sendo este processo denominado normalização. A figura 5.2 ilustra com fotos do aparato típico de um espectrômetro fotoacústico.

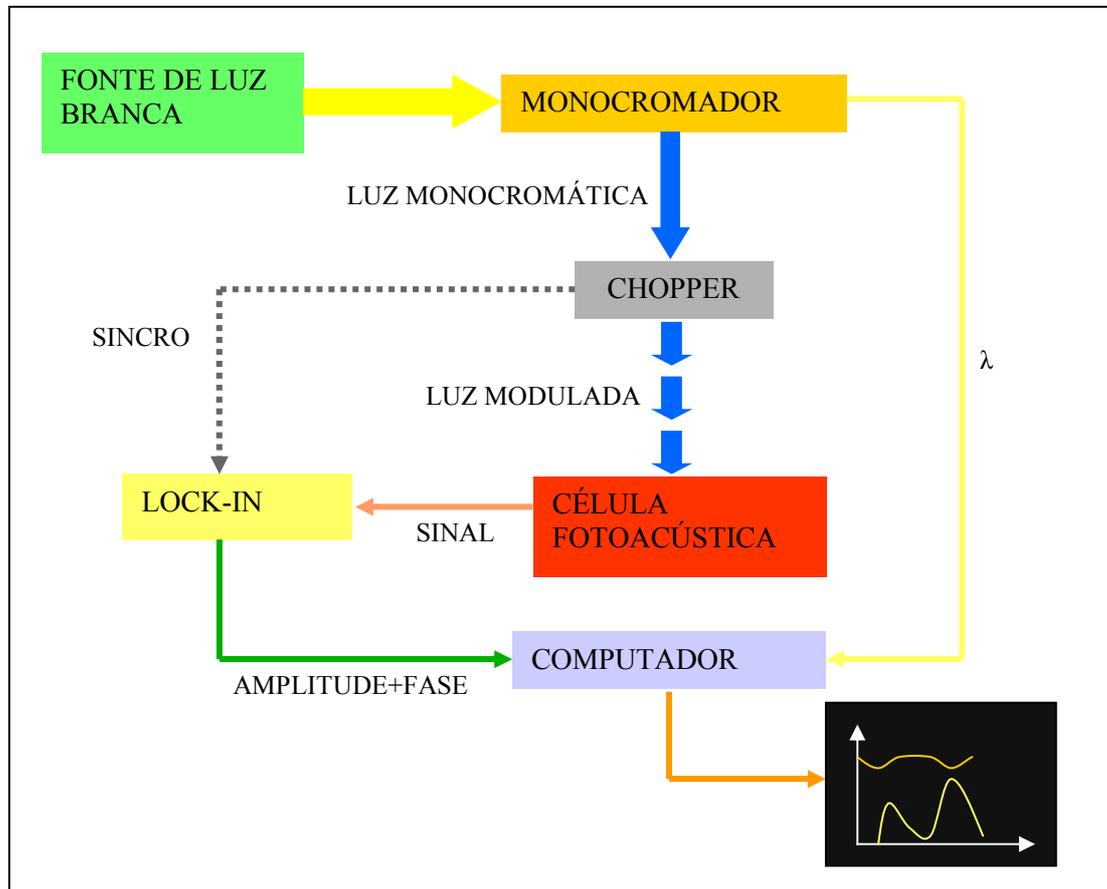


Figura 5.1: Diagrama esquemático de um espectrômetro fotoacústico.

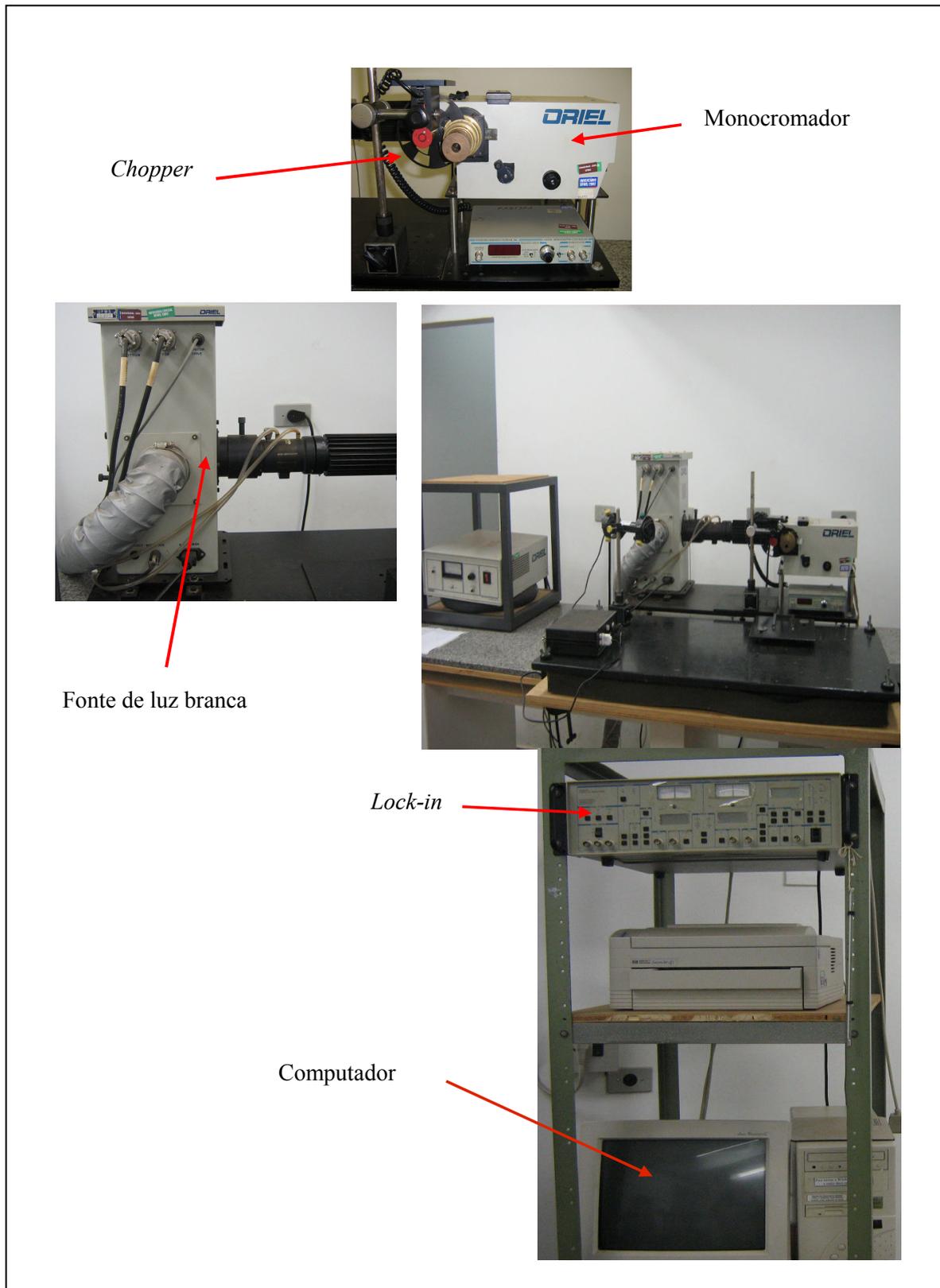


Figura 5.2: Fotos de um espectrômetro fotoacústico

5.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO MOC

Para a construção do MOC, alguns aspectos essenciais precisam ser observados. Assim, passaremos a discuti-los nesta seção.

5.2.1 Elemento Sensível

Os transdutores são dispositivos que convertem uma forma de energia em outra forma, como por exemplo, a energia mecânica de vibração em energia elétrica, que é o caso dos microfones magnéticos mais comuns. Existem dispositivos – sensores - que são sensíveis a algum tipo de perturbação física, tais como, por exemplo, variação de pressão ou de temperatura, e apresentam-na como um nível de tensão, corrente ou resistência elétricas, proporcionais a perturbação detectada. É o caso dos microfones condensadores. A classificação dos sensores é segundo o tipo de elemento sensível utilizado e sua forma de operação. Por exemplo, o microfone condensador a eletreto. Neste trabalho, a denominação microfone óptico é devida ao fato de se utilizar um feixe de laser de prova e um fotodetector no processamento do sinal fotoacústico.

5.2.1.1 Características

O elemento sensível do microfone óptico, ou seja, o conjunto formado pela película espelhada fixada no extremo de uma fina haste de fibra de vidro (fig. 5.3) pode ser comparado a um sistema oscilante, massa-mola, amortecido, com uma frequência de ressonância definida. Este aspecto confere ao microfone uma curva não plana de ganho em função da frequência. Geralmente, no desenvolvimento de um microfone, busca-se obter uma curva de resposta final plana para uma larga faixa de frequência. No entanto, a maioria dos elementos sensíveis dos microfones comerciais são dispositivos sintonizados e a curva plana é obtida por meio de filtros pré-amplificadores, que compensam as faixas de frequências para as quais o elemento sensível apresenta menor ganho. Porém, no projeto do MO não se visou obter uma curva final de resposta plana, pelo contrário, como o objetivo primordial era o de alcançar o máximo de sensibilidade, buscou-se explorar a característica ressonante do elemento sensível para melhorar a relação sinal/ruído. Neste caso, os parâmetros fundamentais que precisam ser

conhecidos e controlados são a frequência de ressonância f_r e o fator de qualidade Q do sistema.

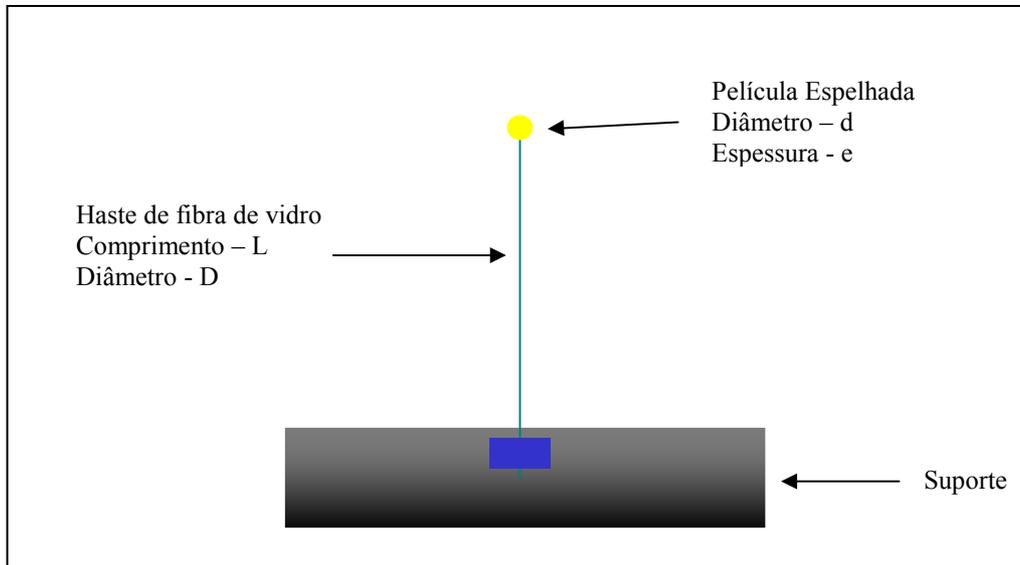


Figura 5.3: Elemento sensível do Microfone Óptico Compacto - MOC

5.2.1.2 Fatores que influenciam a frequência de ressonância.

Tendo em vista a possibilidade de produção em série do MOC, fez-se necessário conhecer e controlar, ainda que de modo aproximado, os parâmetros que influenciam na frequência de ressonância e no fator de qualidade. A fina haste de fibra de vidro do elemento sensível possui um comportamento aproximadamente elástico, nas flexões ou torções de pequenas amplitudes, sendo possível definir o equivalente a uma constante elástica k . A pequena película espelhada circular funciona como a massa m do sistema massa-mola. O sistema oscilatório é amortecido e a dissipação da energia é provocada, principalmente, pelo atrito aerodinâmico da película em forma de disco. Para a construção de um elemento sensível, o ideal é saber, de antemão, quais devem ser o comprimento e a espessura da haste para uma desejada frequência de ressonância, sendo fixados, inicialmente, o diâmetro e espessura da película espelhada. Considerando o elemento sensível do MO como tendo um comportamento equivalente ao de um sistema massa-mola, a expressão simplificada (sem levar em conta o atrito) que mostra a dependência da frequência em função de k e m é:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (13)$$

5.2.1.3 Fatores que influenciam a sensibilidade

A sensibilidade do sistema, ou seja, a capacidade do mesmo ser excitado com o mais baixo sinal fotoacústico depende principalmente da massa e da rigidez da haste que compõem o elemento sensível. Assim, uma haste mais fina, além de apresentar uma massa menor, oferece baixa rigidez (**k**), por outro lado, uma película espelhada menos espessa e de pequeno diâmetro reduzem a massa e o atrito. Logo, objetivando alcançar o máximo de sensibilidade, busca-se construir o elemento sensível com hastes cada vez mais finas e películas espelhadas cada vez menores e leves.

5.2.1.4 Fator de qualidade do elemento sensível

O fator de qualidade (**Q**) do sistema massa-mola exprime o quão seletivo ele é em frequência. A seletividade em frequência privilegia a relação sinal/ruído, pois uma vez que a frequência de modulação da luz incidente na célula fotoacústica é ajustada para a frequência de ressonância do elemento sensível, todos os ruídos que ocorrem em frequências diferentes são captados com ganhos inferiores ao da frequência de ressonância. O fator de qualidade define o ganho máximo da captação na frequência de ressonância. A expressão simplificada para o fator de qualidade do sistema massa-mola em função de **k**, **m**, e **P**, onde este último representa as perdas que promovem a dissipação de energia do sistema, cuja principal é o atrito aerodinâmico da película espelhada, é dada por:

$$Q = \frac{1}{P} \sqrt{k \cdot m} \quad (14)$$

A equação acima mostra que o aumento do fator de qualidade ocorre, principalmente, pela redução da perda a qual depende fundamentalmente do tamanho da película espelhada. A melhoria do fator de qualidade pela redução da perda é preferível ao aumento de **k** e **m**, pois este último diminui a sensibilidade.

5.2.1.5 Determinação da frequência durante a montagem do elemento sensível

Para o início dos trabalhos de construção do MOC, pesquisou-se um material espelhado pronto que fosse adequado para se extrair as diminutas películas espelhadas. As exigências para esse material é que seja de baixa densidade superficial e tenha um espelhamento uniforme em áreas com dimensões da película. O limite do diâmetro da película é em função das dificuldades de manipulação. Atualmente, a confecção do microfone é artesanal e depende muito das habilidades do técnico. Assim, as películas são, no momento, de 0,8 mm de diâmetro e 25 μ m de espessura. Porém, é possível diminuir este tamanho aperfeiçoando-se a técnica de construção. Fixando-se o diâmetro e a massa da película, a frequência de ressonância do elemento sensível passa a ser definida em função dos parâmetros da haste de fibra de vidro. A constante elástica k depende do comprimento L e do diâmetro D da haste. A fim de facilitar a determinação dos parâmetros referidos anteriormente, foram feitos gráficos do comportamento da frequência de ressonância em função de L e em função de D conforme mostrados nas figuras 5.4 e 5.5 respectivamente.

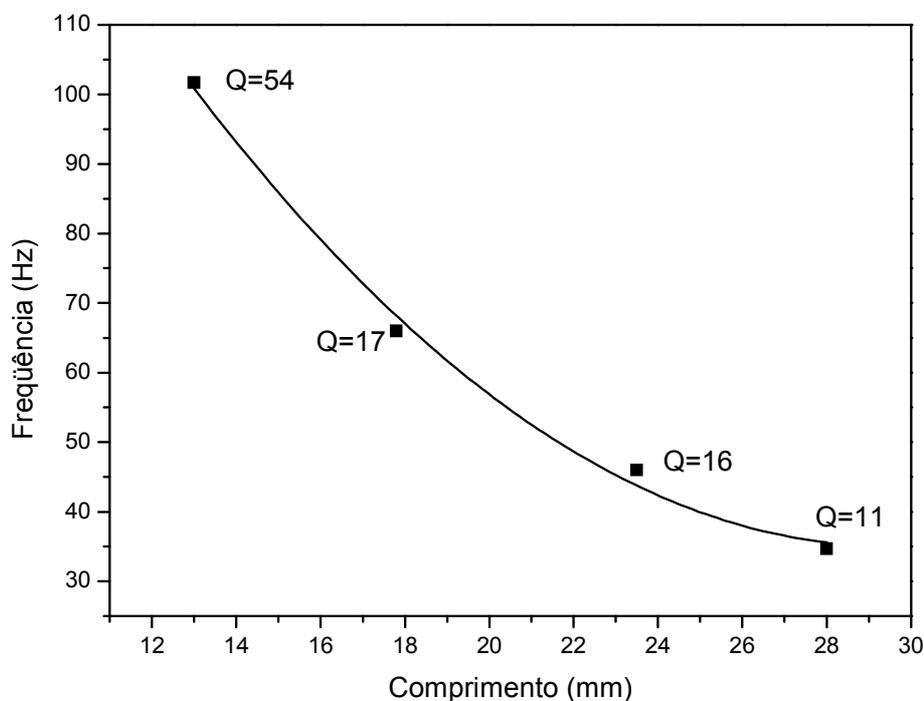


Figura 5.4: Gráfico da frequência de ressonância f_r do elemento sensível do MOC em função do comprimento L , com indicação do fator de qualidade, de uma haste de fibra de 46,6 μ m de diâmetro com disco de película espelhada de 0,8mm de diâmetro.

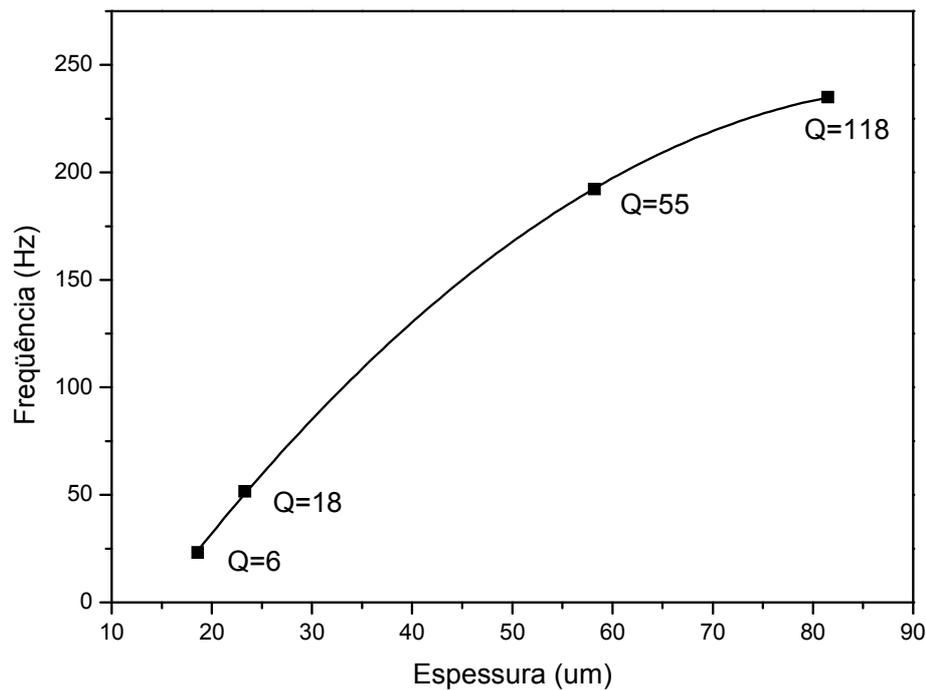


Figura 5.5: Gráfico da frequência de ressonância f_r do elemento sensível do MOC em função do diâmetro D (μm), com indicação do fator de qualidade de uma haste de fibra de vidro de 17,2mm de comprimento com disco de película espelhada de 0,8 mm de diâmetro.

Com o auxílio das curvas anteriores é possível construir elementos sensíveis do MOC sintonizados em uma das frequências dentro das faixas abrangidas nos gráficos. Esta última tem sido a mais explorada nos experimentos de fotoacústica. Curvas semelhantes podem ser construídas para outras faixas de frequências. Salientamos que este recurso não visa à determinação precisa da frequência de ressonância, mas sim avaliar as dimensões da haste para obtenção de uma frequência desejada. Durante os processos de construção de um elemento sensível tem sido possível ajustar, por meio de cortes, o comprimento da haste e, com isto, atingir o valor a frequência desejada.

5.2.2 Características do pick-up e esquema de ligação

5.2.2.1 Modelo

No presente trabalho foi utilizado um pick-up modelo KSS 210A, da Sony, por ser de baixo custo e encontrado facilmente no mercado. Em princípio, outros modelos podem

ser utilizados, contanto que se conheça seus parâmetros básicos, bem como, a função de cada terminal de ligação. Um parâmetro muito importante é a corrente de trabalho do laser semiconductor. Este valor não deve ser excedido para não danificar o laser. No caso do KSS 210A, este valor não deve ultrapassar os 50mA. A figura 5.6 ilustra o modelo de pick-up utilizado.

A função de cada pino do pick-up foi levantada experimentalmente e está apresentada na figura 5.7a. A figura 5.7b mostra a disposição da matriz de detectores.



Figura 5.6: Pick-up KSS210A

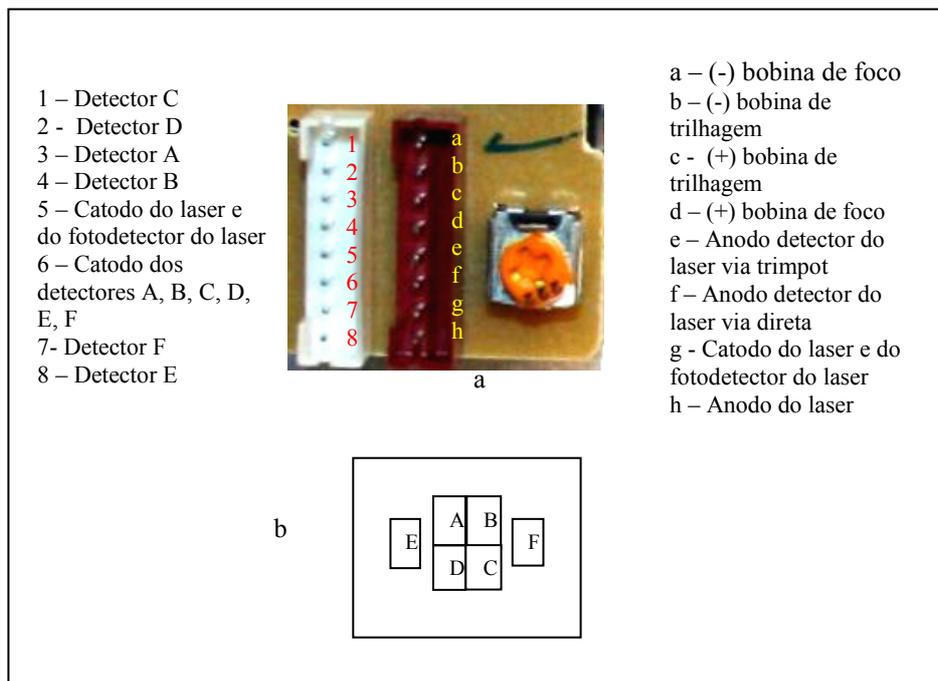


Figura 5.7: a - Função de cada pino do KSS210A; b – disposição da matriz de detectores

5.2.2.2 Esquema de ligação utilizado

Como o intuito deste trabalho é o de apresentar a viabilidade da utilização dos módulos ópticos comerciais para substituir os elementos constituintes do microfone óptico convencional, o esquema de ligação da figura 5.8 utiliza apenas as funções essenciais, tais como: o laser semiconductor, os quatro detectores principais e o detector de intensidade do laser.

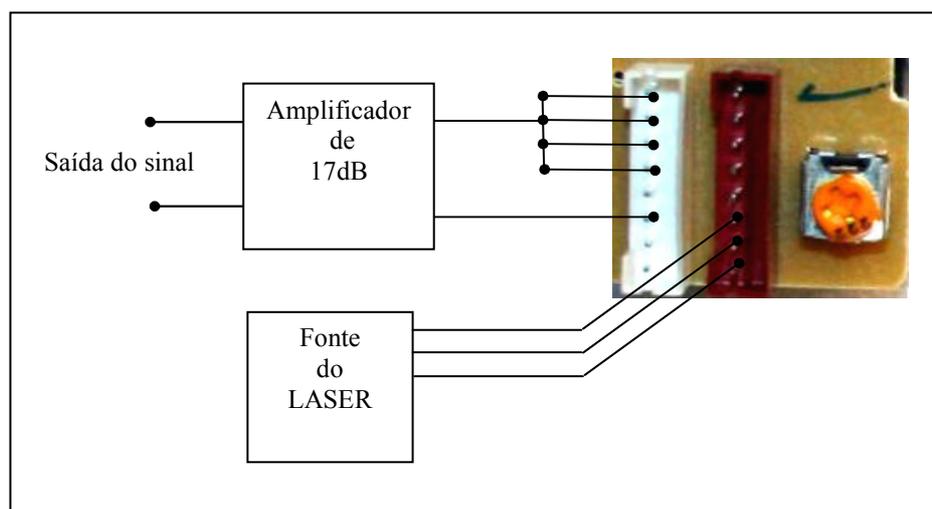


Figura 5.8: Esquema de ligação da pick-up no MOC

5.2.3 Características do pré-amplificador

O sinal produzido pela matriz de detectores é muito baixo. Assim, optou-se pela utilização de um pré-amplificador de 17db com curva de resposta plana na faixa de 20Hz a 20kHz, impedância de entrada de $10M\Omega$ e de saída de 10Ω . A introdução de um amplificador visa também reduzir o ruído elétrico induzido, uma vez que a impedância da matriz de detectores é muito elevada e, sua ligação direta ao *lock-in* por meio de cabos, permitiria a indução de ruídos elétricos. O ruído introduzido pelo próprio amplificador é de 150nV (medido com a entrada a zero). A figura 5.9 apresenta o circuito eletrônico do pré-amplificador utilizado e demais características. A figura 5.10 apresenta a curva de resposta em função da frequência do sinal de entrada do amplificador.

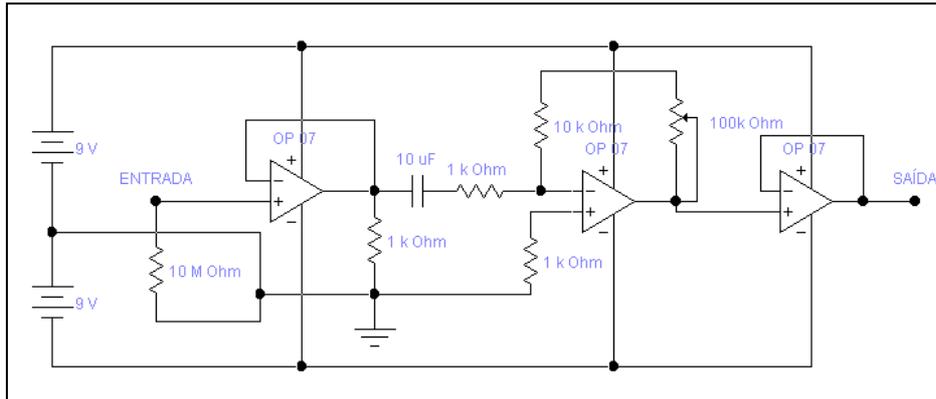


Figura 5.9: Circuito eletrônico do pré-amplificador com impedância de entrada $10\text{M}\Omega$ e impedância de saída menor que 10Ω . Ruído de saída com entrada a zero: 150nV .

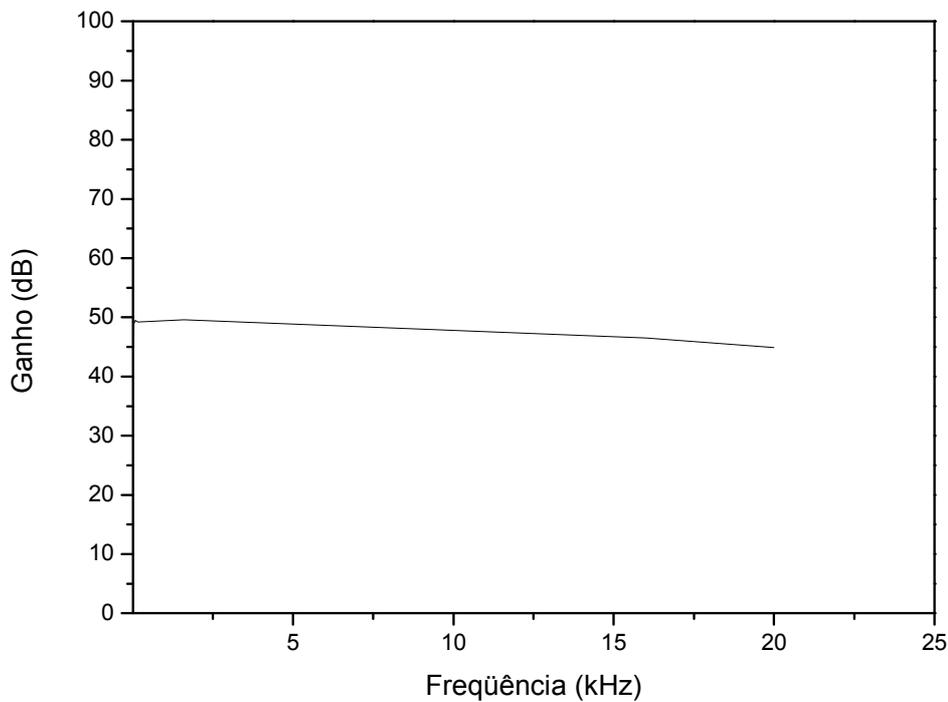


Figura 5.10: Curva de ganho em função da frequência do sinal de entrada do amplificador.

5.2.4 Características da fonte do laser

O laser contido no pick-up é munido de um fotodetector que monitora a intensidade de emissão. A fim de garantir a estabilidade do laser, a fonte deve permitir uma auto-regulação em função da leitura efetuada pelo fotodetector. A figura 5.11 mostra o circuito eletrônico da fonte utilizada. A alimentação elétrica de 3V é garantida por duas pilhas

(grandes) ligadas em série, e a alimentação simétrica de +9V e -9V por duas baterias de 9V. Foram utilizadas pilhas alcalinas para aumentar a autonomia. No entanto, pode-se utilizar, também, pilhas recarregáveis. O uso de pilhas reduz os ruídos elétricos, além de facilitar a blindagem de todo o conjunto. A blindagem eletromagnética de todo o conjunto, ou seja, pick-up, amplificador e fontes de alimentação, foi realizada colocando todos esses componentes dentro de caixas metálicas com aterramento elétrico.

A configuração de ligação utilizada mostrou-se adequada para os ensaios realizados. Contudo, a mesma pode e deve ser aperfeiçoada para melhorar os resultados.

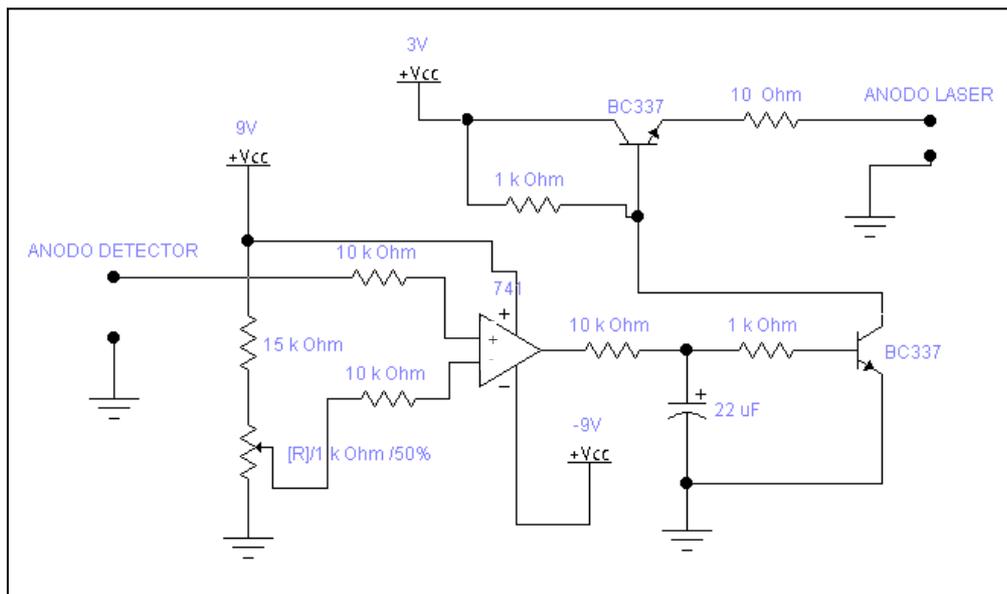


Figura 5.11: Circuito eletrônico da fonte do laser

5.3 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MOC

Nesta etapa será apresentado o critério utilizado na avaliação do desempenho do MOC.

5.3.1 Parâmetros Básicos

Os parâmetros básicos que devem ser avaliados de um microfone, visando seu emprego na fotoacústica são: a curva de resposta em função da frequência, a curva de resposta em função da intensidade do sinal de áudio e o NEP (*Noise Equivalent Power*).

5.3.1.1 Curva de resposta em função da frequência

O gráfico de Sinal x Frequência é obtido variando-se a frequência de modulação da luz incidente sobre uma amostra padrão (carvão vegetal). A partir dele, pode-se determinar o fator de qualidade Q do transdutor, usando a expressão:

$$Q = f_r / \Delta f \quad , \quad (14)$$

onde, f_r é a frequência de ressonância e Δf é o intervalo entre as duas frequências para as quais o sinal corresponde a 70,7% do valor máximo.

5.3.1.2 Curva de resposta em função da intensidade do sinal de áudio

O emprego de um microfone em espectroscopia fotoacústica exige que o sinal em sua saída dependa linearmente do áudio incidente sobre seu elemento sensível. Como o sinal fotoacústico produzido por uma amostra depende da potência da luz incidente, variando-se a potência da luz, o sinal elétrico na saída do microfone deve variar proporcionalmente. O gráfico de Sinal x Potência é utilizado na determinação do NEP. Neste trabalho, a curva de resposta em função da potência da luz incidente foi obtida variando-se a abertura da fenda graduada na saída do conjunto monocromador, sendo feita a medida da potência da luz incidente com a fenda na máxima abertura (fenda 3) e, para isto, utilizou-se o radiômetro. Os demais valores de potência foram calculados.

5.3.1.3 Potência equivalente ao ruído (NEP)

O NEP (*Noise Equivalent Power*) é definido em termos da potência de radiação luminosa equivalente ao valor do sinal de ruído medido no amplificador, quando não há luz incidente sobre a amostra, que geralmente consiste de um pequeno disco de teflon enegrecido ou de pó de carvão vegetal. Uma vez conhecido o valor do NEP e de posse das características da amostra, tais como a densidade (ρ), o calor específico (c) e a condutividade térmica (k), é possível determinar a menor variação de temperatura (ΔT_{\min}) detectável, que é um dos

parâmetros mais importantes para a avaliação da qualidade de uma célula fotoacústica. O valor do NEP é calculado através da expressão:

$$NEP = \frac{P_{RUÍDO}}{\sqrt{\frac{f}{Q}}} \quad (15)$$

onde, $P_{RUÍDO}$ é a potência do ruído obtido com o auxílio da curva de Sinal x Potência, f é a frequência de modulação da luz incidente e Q é o fator de qualidade do amplificador (*lock-in*). O valor do ruído geral do aparato é obtido pelo fechamento completo da fenda na saída do monocromador.

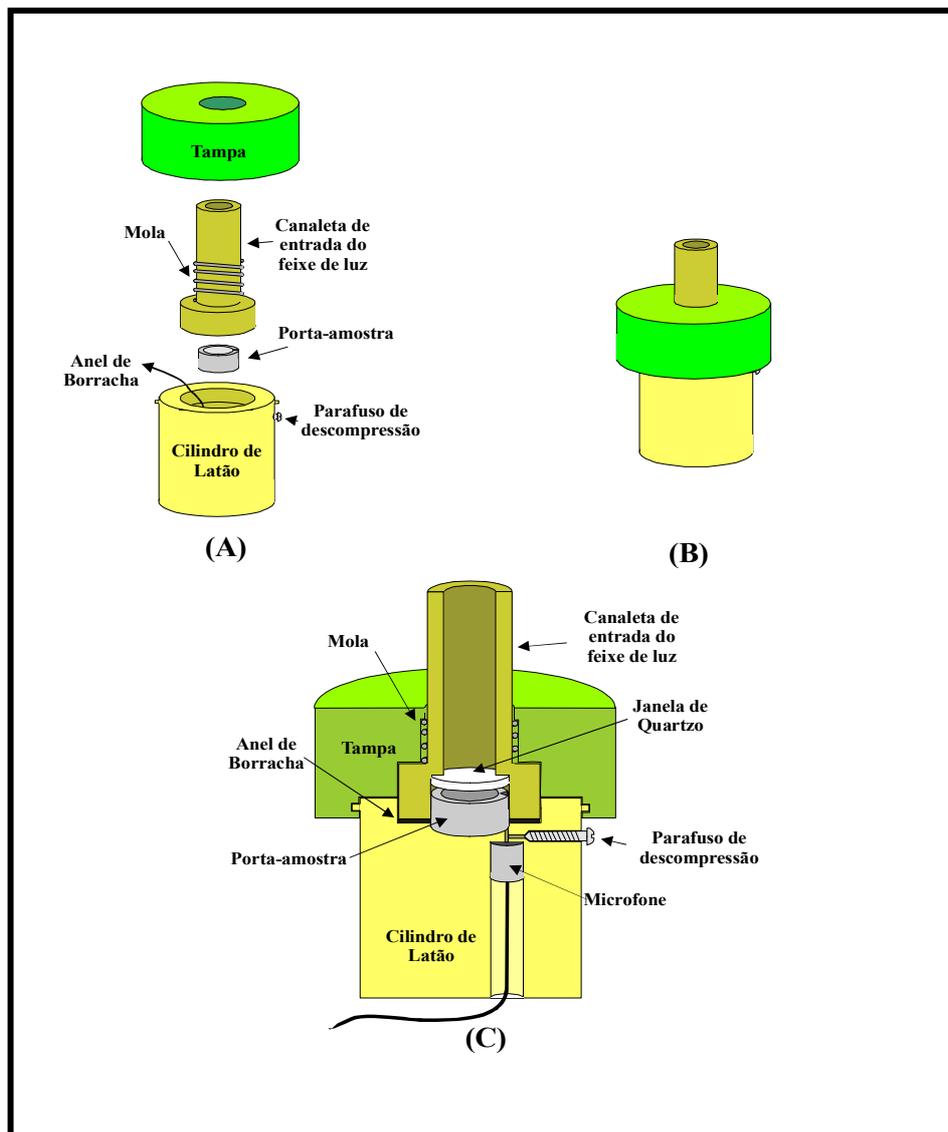


Figura 5.12: Desenho da célula fotoacústica utilizando um microfone condensador B&K modelo 4192.

Neste trabalho foi adotado como critério de avaliação do desempenho, fazer a comparação entre os resultados obtidos com o MOC e os de uma célula fotoacústica, que utiliza como transdutor um microfone condensador B&K, modelo 4166, de qualidade amplamente reconhecida. A célula fotoacústica utilizada foi desenvolvida no laboratório, tem sido utilizada com excelentes resultados e está esquematizada na figura 5.12.

5.3.1.4 Metodologia de análise da composição do ruído geral do MOC

Outro levantamento importante diz respeito à contribuição de cada parte constituinte do MOC para o ruído geral, ou seja, qual a influência de cada tipo de ruído. Para isto, dividiu-se o ruído geral, observado sobre o *lock-in*, em ruídos produzidos mecanicamente sobre o elemento sensível e ruídos produzidos eletricamente. Os ruídos mecânicos são devidos a vibração da bancada e aos ruídos acústicos ambientes. Os ruídos elétricos são devidos a agitação térmica dos portadores de carga nos vários componentes eletrônicos, desde a matriz de fotodetectores até a saída do cabo que vai conectado ao *lock-in*; os devidos à indução do campo eletromagnético externo sobre circuito e o devido a instabilidade do LASER.

Neste trabalho foram efetuadas as seguintes medições de ruído:

- a) R_A – Ruído elétrico do amplificador isolado com a entrada de sinal aterrada;
- b) R_{EG} – Ruído elétrico geral do MOC com a alimentação do LASER desligada;
- c) R_{EGL} – Ruído elétrico geral do MOC com a alimentação do LASER ligada e o elemento sensível substituído por um espelho fixo;
- d) R_G – Ruído geral medido com o MOC na configuração de medição, porém sem incidência de luz sobre a amostra.

A medição de R_{EG} permite avaliar a contribuição do ruído que é produzido, principalmente, pela indução eletromagnética externa, devido à deficiência de blindagem. Ela exclui a contribuição devida ao LASER uma vez que este permanece desligado. Já a medição de R_{EGL} inclui a contribuição devida ao LASER, mas exclui a de natureza mecânica, já que o elemento sensível foi eliminado pela utilização de um espelho fixo para refletir o LASER.

A diferença entre R_G e R_{EGL} fornece a parcela de ruído gerada mecanicamente.

Observações:

- 1 – Todas as medidas de ruídos foram tomadas sobre o *lock-in*;
- 2 – Durante a medição de R_G , a lâmpada de arco Xe permanece ligada a fim de se ter as condições reais de produção de campo eletromagnético próximo ao MOC.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CURVA DE SINAL X FREQUÊNCIA DE MODULAÇÃO

A figura 6.1 mostra a curva de Sinal x Frequência de modulação, do MOC munido de um elemento sensível com diâmetro $D = 12,5\mu\text{m}$, comprimento $L = 8,6\text{mm}$ e película espelhada com diâmetro $d = 0,8\text{mm}$ e espessura $e = 25\mu\text{m}$. Temos que $f_r = 50\text{Hz}$ com sinal máximo de 57mV . Os pontos de $70,7\%$ do valor máximo do sinal, ou seja, 41mV , ocorrem para as frequências de 42Hz e 56Hz , aproximadamente, e fornecem um Δf igual a 14Hz . Assim, utilizando a equação 14, obtemos o fator de qualidade $Q = 3,6$.

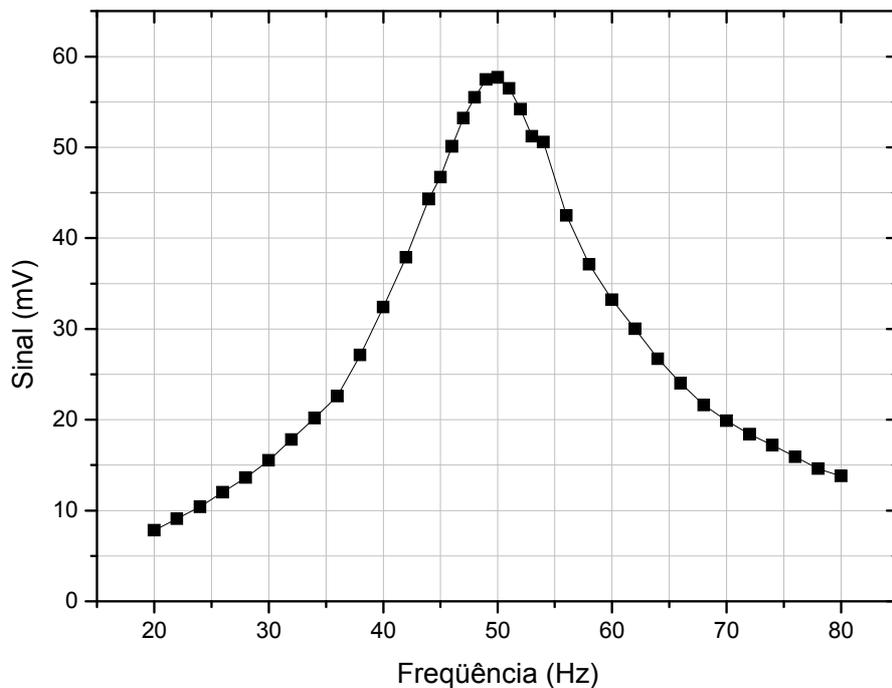


Figura 6.1: Gráfico da curva de resposta do MOC em função da frequência de modulação da luz incidente para um elemento sensível com diâmetro $D = 12,5\mu\text{m}$, comprimento $L = 8,6\text{mm}$ e película espelhada de diâmetro $d = 0,8\text{mm}$ e espessura $e = 25\mu\text{m}$.

6.2 CURVA DE RESPOSTA EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA DA LUZ MODULADA

Nas tabelas 2 e 3, temos os dados referentes a medida do sinal em função da variação da potência de luz monocromática ($\lambda=470\text{nm}$, pico da lâmpada de Xe) modulada em 50Hz , obtidos, respectivamente, com o MOC e com a célula B&K.

Tabela 2: Dados referentes à resposta do MOC em função da variação da potência da luz incidente na amostra de carvão vegetal em pó.

Sinal (mV)	Potência (mW)
17,1	73,4
14,2	66,7
11,4	54,6
8,5	41,3
5,7	27,8
2,8	13,9
2,3	10,9
1,7	8,5
1,1	5,6
0,6	2,9
0,171	0,69
0,142	0,62
0,114	0,55
0,085	0,45
0,057	0,345
0,046	0,315
0,034	0,255
0,028	0,225
0,023	0,205
0,017	0,205
0,011	0,17

TABELA 3: Dados referentes à resposta da célula B&K em função da variação da potência da luz incidente na amostra de carvão vegetal em pó.

Sinal (mV)	Potência (mW)
17,1	15,87
0,0171	0,01739
0,0142	0,01585
0,0114	0,0129
0,0085	0,0097
0,0057	0,0065
0,0046	0,00517
0,0034	0,00387
0,0028	0,00322
0,0023	0,00251
0,0017	0,00188
0,0011	0,00125
6E-4	5,7E-4

As figuras 6.2 e 6.3 mostram, respectivamente, as curvas de resposta do MOC e do B&K em função da variação da potência da luz incidente sobre uma amostra padrão de carvão vegetal de 8mm de diâmetro.

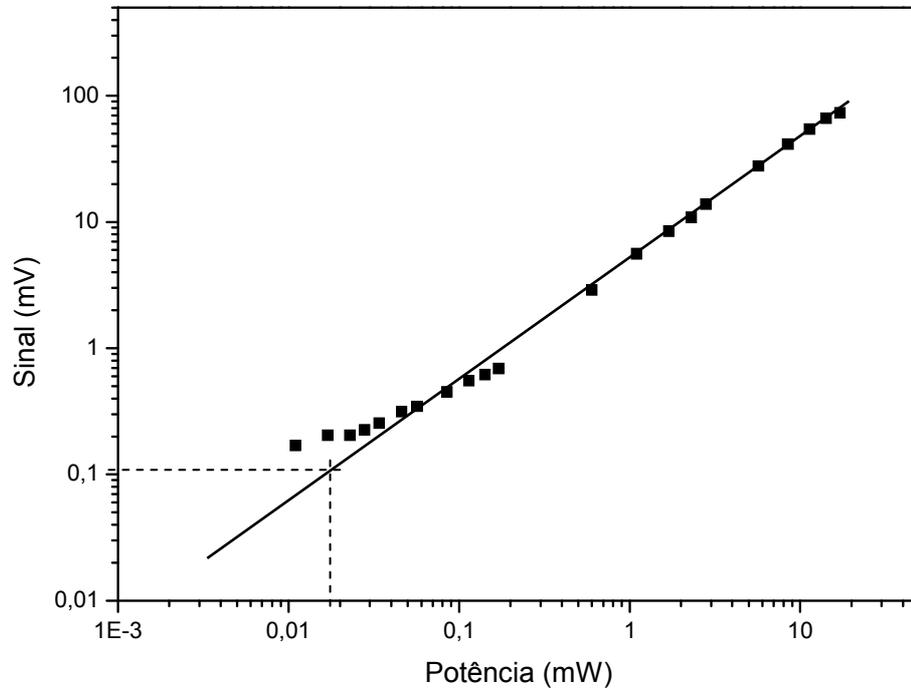


Figura 6.2: Curva de resposta em função da potência de luz incidente do MOC

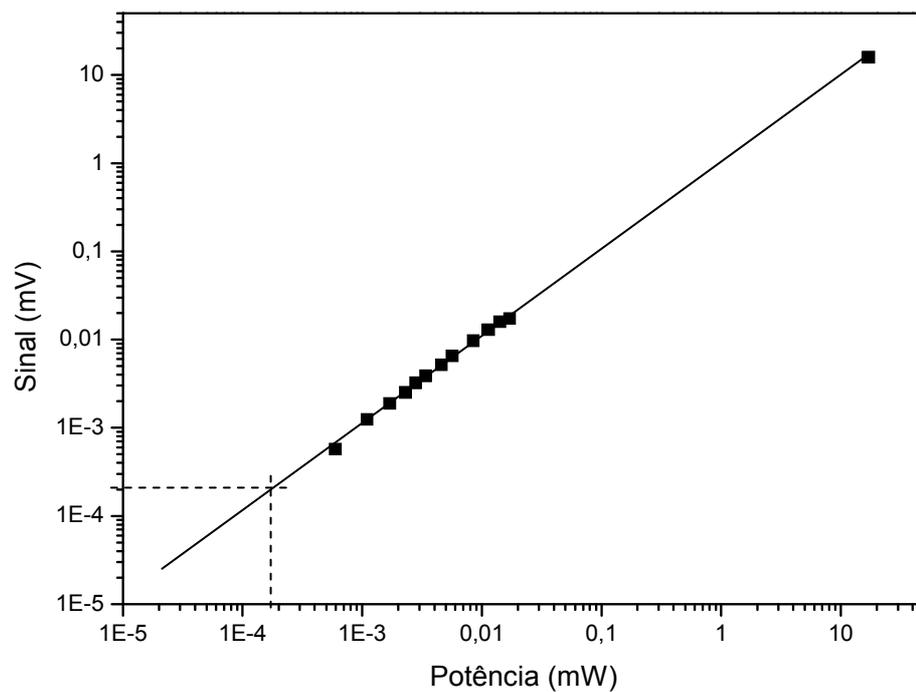


Figura 6.3: Curva de resposta em função da potência de luz incidente do B&K

Percebe-se, na figura 6.2, que o MOC apresenta o comportamento linear desejado apesar da distorção que ocorre para valores de sinal menores que 1mW, região onde há forte influência do ruído.

6.2.1 Determinação do “Noise Equivalent Power” (NEP)

O valor do ruído geral do MOC foi de 0,11 mV (média de cinco valores), verificado sobre o amplificador *lock-in*, com fator de qualidade $Q=5$ e constante de tempo ajustada em 10s. Localizando-se este valor no eixo vertical da curva da figura 6.2 e efetuando-se sua projeção no eixo horizontal, com o auxílio extrapolação da reta média, obteve-se o valor de $P_{\text{RUÍDO}} = 0,018 \text{ mW}$. Utilizando a equação 15 para $f = 50\text{Hz}$ e $Q = 5$, obteve-se, para o MOC, $\text{NEP} = 5,69 \times 10^{-3} \text{ mW/Hz}^{-1/2}$. Aplicando-se o mesmo procedimento para a célula B&K, obteve-se um valor de ruído geral $2 \times 10^{-4} \text{ mV}$ e, com o auxílio da curva da figura 6.3, $P_{\text{RUÍDO}} = 1,8 \times 10^{-4} \text{ mW}$ que corresponde a um $\text{NEP} = 5,69 \times 10^{-5} \text{ mW/Hz}^{-1/2}$. A tabela 4 apresenta a síntese dos dados do MOC e da célula B&K, onde S_M é o sinal máximo obtido com a amostra de carvão vegetal para $\lambda = 470\text{nm}$ (pico da lâmpada de Xe).

Tabela 4 - Comparação entre os dados referentes aos ruídos gerais, NEP e relação sinal máximo/ruído geral do MOC e B&K.

Microfone	R_G (mV)	$P_{\text{RUÍDO}}$ (mW)	NEP (mW/Hz ^{-1/2})	Sinal máximo (mV)	S_M/R_G
MOC	0,11	0,018	$5,69 \times 10^{-3}$	73,4	$0,7 \times 10^{+3}$
B&K	2×10^{-4}	$1,8 \times 10^{-4}$	$5,69 \times 10^{-5}$	15,87	$0,8 \times 10^{+5}$

6.2.2 Medidas das contribuições para o ruído geral

Na tabela 5 apresentamos os dados referentes às várias medições de ruído, conforme descrito no item 5.3.1.4, verificados sobre o *lock-in* com constate de tempo 10s.

Tabela 5: Dados referentes às medições das contribuições dos diversos tipos de ruídos conforme explicado no item 5.1.3.4

R_G (μV)	R_{EG} (μV)	R_{EGL} (μV)	R_A (μV)	$R_G - R_{EGL}$ (μV)
110,0	3,0	3,0	0,15	107,0

6.3 ESPECTROS DE FOLHA VEGETAL

A figura 6.4 mostra os espectros de uma folha vegetal obtidos com o MOC e com a célula fotoacústica B&K, normalizados relativamente com o espectro do carvão vegetal.

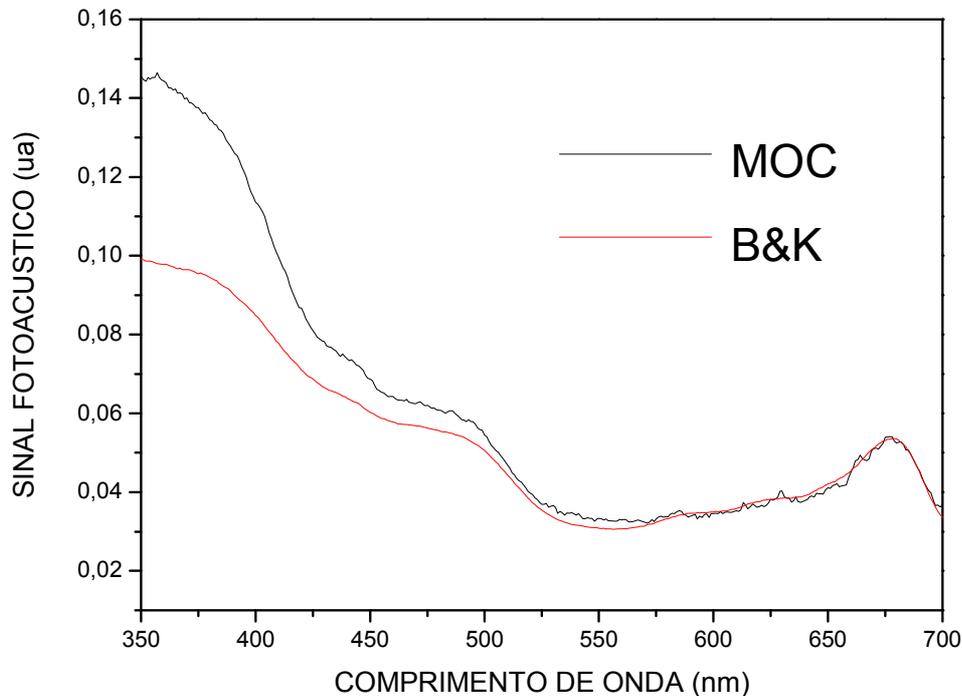


Figura 6.4: Espectros de folha vegetal, normalizados em relação ao carvão vegetal, obtidos com o MOC (—) e com a célula B&K (—).

6.4 DISCUSSÃO

Primeiramente, enfatizamos que o foco de todo o trabalho foi alcançar um resultado que comprovasse a viabilidade de se utilizar o dispositivo eletrônico *pick-up*, empregado nos aparelhos de leitura de disco compacto (CD), com o fim de substituir os componentes originais do microfone óptico, conforme descrito no capítulo 3.

A compactação e a redução de custos ficaram evidentes tendo em vista o reduzido tamanho obtido com o protótipo nº 2 (ver figura 4.5c) e o fato do módulo *pick-up* utilizado ter custado R\$ 15,00. Além disto, durante os ensaios verificou-se que os resultados foram reproduzidos sem a necessidade de se reajustar o sistema após cada troca de amostra, tendo esta tarefa se tornado muito simples, e mesmo após um longo tempo fora de utilização (por vezes mais de mês) o aparato conservou suas características de funcionamento.

A curva de resposta apresentada na figura 6.1 revela que é possível variar a frequência de modulação numa faixa de 14Hz em torno da frequência de ressonância, e ainda obter um bom sinal de resposta. Isto é devido o elemento sensível ter apresentado um fator de qualidade baixo ($Q = 3,6$). No entanto, durante o processo de construção de elementos sensíveis, verificou-se ser possível o controle, com razoável facilidade, dos parâmetros referidos anteriormente, pelo uso das curvas das figuras 5.2 e 5.3.

Os dados da tabela 5 mostram que a versão nº 2 do MOC, com um elemento sensível de fator de qualidade $Q = 3,6$ operando em 50Hz, apresentou um NEP cem vezes maior que o obtido com a célula B&K. A razão para este resultado está relacionada, principalmente, com o alto valor de ruído gerado no MOC. Isto explica, inclusive, a mudança do coeficiente angular da curva de Sinal x Potência, representado na figura 6.2, para valores baixos de potência de luz incidente na amostra, já que o ruído predomina sobre o sinal fotoacústico. A comparação dos dados S_M/R_G da mesma tabela, comprova a coerência dos resultados dos NEP, uma vez que ela evidencia que a relação sinal ruído do MOC é aproximadamente cem vezes menor que a da célula B&K. Através dos dados da tabela 6 nota-se que a principal fonte do ruído verificada é de natureza acústica, devido aos ruídos sonoros presentes no laboratório. Esta afirmação baseia-se no fato de R_{EGL} ser $3\mu V$, o que representa 2,7% do ruído geral, sabendo que em R_{EGL} estão contidos apenas o ruído de natureza eletromagnética e o devido ao LASER. Assim, a diferença $R_G - R_{EGL}$ fornece a contribuição devido ao ruído de origem mecânica, que é transmitido ao elemento sensível por meio de ondas sonoras e vibrações da mesa. Esta última, certamente, é menos predominante, já que, além do sistema anti-vibração da própria bancada, há ainda o que foi implementado no MOC. Desta forma, dos $110\mu V$ de ruído geral, $107\mu V$ (97,3%) são, em boa parte, devido ao ruído acústico transmitido ao MOC pelo ar. Por outro lado, como R_{EG} e R_{EGL} tiveram o mesmo valor, podemos concluir que a contribuição devido ao ruído do LASER é muito menor que aquela devido à indução eletromagnética externa.

A análise anterior nos mostra que o protótipo testado apresenta deficiência nas blindagens acústica e elétrica. Entretanto, os resultados são úteis no sentido de indicar o caminho a ser tomado em futuras modificações, visando o seu aperfeiçoamento.

No MOC, o circuito do amplificador de 17dB, a *pick-up* e a fonte de alimentação do LASER foram montados em compartimentos metálicos (caixas de chapa de alumínio de 1,5mm de espessura) separados, havendo a necessidade de interligá-los por meio de cabos. Isto permitiu uma maior interferência de campos eletromagnéticos externos, principalmente, no cabo que liga a *pick-up* ao amplificador, por se tratar de uma ligação em alta impedância.

Por outro lado, os cabos coaxiais utilizados possuíam blindagem simples (tipo malha) em camada única. Assim, a fim de reduzir o ruído elétrico é necessário montar todo o dispositivo em um único módulo e acondicioná-lo em um só compartimento metálico, sem emendas, e utilizar uma única tampa. As paredes devem ser de pelo menos 10mm de espessura. Também é necessária a utilização de cabos coaxiais com blindagem de melhor qualidade (múltiplas camadas de blindagem).

Para melhorar o isolamento acústico, o formato circular é preferível ao retangular no desenho do MOC. Também será bom utilizar um metal mais denso, como, por exemplo, o latão para a confecção do compartimento do *pick-up*. A caixa metálica envolvendo a *pick-up* e o elemento sensível do protótipo nº 2 foi feita em alumínio (5mm de espessura) no formato retangular, contendo várias emendas. Este desenho não propiciou boas blindagens. Pode-se ainda confinar o elemento sensível em uma janela de vidro isolando-o. Isto aumentará o isolamento acústico e facilitará a implementação de câmara de vácuo.

Pode-se, ainda, aperfeiçoar o amplificador de 17dB, pela utilização de componentes de baixo ruído e diminuição da banda de passagem.

Finalmente, o emprego de câmara de vácuo contribuirá ainda mais, considerando que a principal fonte de ruído foi acústica.

Com as mudanças sugeridas acima, é possível atingir uma significativa redução do ruído geral o que permitiria atingir um desempenho comparável ou até superior ao da célula B&K, tendo em vista que o MO é um sistema ressonante, o que não ocorre com a célula B&K.

7 CONCLUSÃO

O propósito deste trabalho foi o de apresentar uma alternativa de construção, para o microfone óptico, compacta e de baixo custo. Os resultados obtidos nesta etapa mostram que é possível utilizar o *pick-up* para substituir os componentes da versão inicial do microfone óptico. Isto fica evidente, principalmente, na comparação dos espectros da folha vegetal obtidos com o MOC e com a célula B&K. No entanto, percebe-se claramente que se deve aprimorar a construção a fim de alcançar desempenho mais elevado, que propicie, sobretudo, a alta sensibilidade do MOC. As análises feitas dos resultados apontam para a necessidade de melhorias, conforme indicadas ao término da discussão. Uma vez implementadas, acreditamos ser plenamente possível atingir e, até mesmo, ultrapassar a desempenho do microfone convencional. Finalmente, os resultados ora alcançados estimulam o ideal de construir uma versão compacta de alto desempenho e baixo custo, pois servirão para direcionar os aperfeiçoamentos futuros, uma vez que revelaram as reais exigências do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BELL, A. G. On the production and reproduction of sound by light. **American Journal of Science**, 120, 305-324, 1880.

BELL, A. G. The production of sound by radiant energy. **Science**, 2(49), 242-253, 1881.

BELTON, P. S.; TANNER, S. F. Determination of the moisture content of starch using near infrared photoacoustic spectroscopy. **Analyst**, 108, 591-593, 1983.

BOCCARA, A.C.; FOURNIER, D.; BADOZ, J. Thermo-optical spectroscopy: Detection by the mirage effect. **Applied Physics Letters**, 36, 130, 1980.

BUTKOV, E. **Física Matemática**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1979. 502-513.

COUFAL, H. Photothermal spectroscopy using a pyroelectric thin-film detector. **Applied Physics Letters**, 44, 59, 1984.

DE PAULA, M. H.; VINHA, C. A.; BADINI, R. G. High-sensitivity optical microphone for photoacoustics. **Review of Scientific Instruments**, 63(6), 3487-3491, 1992.

DE PAULA, M. H.; DE CARVALHO, A. A.; VINHA, C. A.; CELLA, N.; VARGAS, H. Optical microphone for photoacoustic spectroscopy. **Journal of Applied Physics**, 64(7), 3722-3724, 1988.

DE PAULA, M. H.; OMIDO, A. R.; SCHUMAHER, D. F. Q.; DA GAMA, H. H. Optical microphone: New results. **Review of Scientific Instruments**, 75(9), 2863-2864, 2004.

FARIA JR., I. F.; GHIZONI, C. C.; MIRANDA, L. C. M.; VARGAS, H. Photopyroelectric versus photoacoustic characterization of photovoltaic cells. **Journal of Applied Physics**, 59(9), 3294-3296, 1986.

FARROW, M. M.; BURNHAM, R. K.; AUZANNEAU, M.; OLSEN, S. L.; PURDIE, N.; EYRING, E. M. Piezoelectric detection of photoacoustic signals. : **Applied Optics**, 17, 1093-1098, 1978.

GORDON, J. P.; LEITE, R. C. C.; MOORE, R. S.; PORTO, S. P. S.; WHINNERY, J. R. Long-transient effects in lasers with inserted liquid samples. **Journal of Applied Physics**, 36, 3, 1965.

HORDVIK, A.; SCHLOSSBERG, H. Photoacoustic technique for determining optical absorption coefficients in solids. **Applied Optics**, 16, 101-107, 1977.

KING, A. A.; KIRKBRIGHT, G. F. Optoacoustic spectrometry for the examination of solid and semisolid samples. **Laboratory Practice** 25(6), 377-83, 1976.

MANDELIS, A. Frequency-domain photopyroelectric spectroscopy of condensed phases (PPES): A new, simple and powerful spectroscopic technique. **Chemical Physics Letters**, 108, 388-392, 1984.

MARQUEZINI, M. V.; CELLA, N.; MANSANARES, A.M.; VARGAS, H.; MIRANDA, L. C. M. Open photoacoustic cell spectroscopy", **Measurement Science and Technology**, 2, 396-401, 1991.

MELLO, S. M. N.; GHIZONI, C. C.; MIRANDA, L. C. M. Photoacoustic characterization of photovoltaic cells. **Journal of Applied Physics**, 61(11), 5176-5177, 1987.

NERY, J. W.; PESSOA JR., O.; VARGAS, H.; REIS, F. DE A. M.; GABRIELLI, A. C.; MIRANDA, L. C.; VINHA, C. A. Photoacoustic spectroscopy for depth-profile analysis and herbicide monitoring in leaves. **Analyst**, 112(11), 1487-1490, 1987.

NORDAL, P. E.; KANSTAD, S. O. Photothermal radiometry. **Physica Scripta**, 20, 659-662, 1979.

PAIVA, R. F.; BARJA, P. R. Células fotoacústicas para medidas em sistemas biológicos. **Revista Univap**, 13, 14-15, 2006.

PARKER, J. G. Optical absorption in glass: investigation using an acoustic technique. **Applied Optics** 12(12), 2974-7, 1973.

PARK, S. M.; DIEBOLD, G. J. Interferometric microphone for optoacoustic spectroscopy. **Review of Scientific Instruments**, 58(5), 772-775, 1987.

PEREIRA, A. C.; ZERBETTO, M.; SILCA, G. C.; VARGAS, H.; DA SILVA, W. J.; DE OLIVEIRA NETO, G.; CELLA, N.; MIRANDA, L. C. M. OPC technique for in vivo studies in plant photosynthesis research. **Measurement Science and Technology**, 3, 931-934, 1992.

PESSOA JR., O. **Aplicações de medidas de fase do efeito fotoacústico**. Dissertação de Mestrado – Instituto de Física Gleb Wataghim, Unicamp, Campinas, 1985.

PESSOA JR., O.; CÉSAR, C. L.; PATEL, N. A.; VARGAS, H.; GHIZONI, C. C.; MIRANDA, L. C. M. Two beam photoacoustic phase measurements of the thermal diffusivity of solids. **Journal of Applied Physics**, 59(4), 1316-1318, 1986.

PFUND, A. H. Atmospheric contamination. **Science**, 90, 326, 1939.

ROCKLEY, M. G.; DAVIS, D. M.; RICHARDSON, H. H. Fourier-transformed infrared photoacoustic spectroscopy of biological materials. **Science**, 210, 916-920, 1980.

ROENTGEN, W. C. On tones produced by the intermittent irradiation of a gas. **Philosophical Magazine**, 11(5), 308, 1881.

ROSENCWAIG, A. **Photoacoustics and Photoacoustics Spectroscopy**. New York: John Wiley & Sons, 1980.

ROSENCWAIG, A.; GERSHO, A. Theory of photoacoustics effect with solids. **Journal of Applied Physics** 47(1), 64-69, 1976.

SIVAKESAVA, S.; IRUDAYARAJ, J. Analysis of potato chips using FTIR photoacoustic spectroscopy. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 80, 1805-1810, 2000.

STONE, J. Measurements of the absorption of light in low-loss liquids. **Journal of the Optical Society of America**, 62, 327-333, 1972.

TYNDALL, J. F. R. S. Action of an intermittent beam of radiant heat upon gaseous matter. **Proceedings of the Royal Society of London**, 31, 307-317, 1881.

VIENGEROV, M. L. New method of gas analysis based on Tyndall-Roentgen optoacoustic effect. **Dokl. Akad. Nauk. SSSR**, 19, 687, 1938.

VINHA, C. A.; HAAS, U. Qualitative and semiquantitative analysis of dried fruits and seasoning products of paprika using photoacoustic spectroscopy. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 45(4), 1273-1277, 1997.

ZHAROV, V. P.; LETOKHOV, V. S. **Laser Optoacoustic Spectroscopy**. Berlin: Springer-Verlag, 1985. 2-15.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)