- UNIVERSIDADE DE SAO PAULO -

CAMPUS SAO CARLOS

" DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE
MICROSCÓPIO FOTOACÚSTICO "

José Carlos Rossi

Dissertação apresentada ao
Instituto de Física e Quí-
mica de São Carlos, USP,
para obtenção do título de
Mestre em Física Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Valentin Obac Roda

Departamento de Física e Ciência dos Materiais

- SAO CARLOS 1983 -

OK
USP / IFQSC / SBI

8-2-000796

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE

José Carlos Rossi

APRESENTADA

AO INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO CARLOS, DA UNIVERSI

DADE DE SÃO PAULO, EM 29 DE agosto DE 1988.

COMISSÃO JULGADORA:

Dr. Valentin Obac Roda

Orientador

Dr. Jan F.W. Slaets

Dr. Mauro Henrique de Paula

A meus pais e meu irmão.

José Rossi

Cleomar Aiello Rossi

Agnaldo Rossi.

- AGRADECIMENTOS -

Ao professor Dr. Valentin Obac Roda como meu orientador neste trabalho, pelo incentivo, dedicação e auxílio constante e sobretudo pela amizade.

Ao professor Dr. Michel André Aegerter , pelas idéias, incentivos e disponibilidade.

Ao professor Dr. José Hiroki Saito pelas discussões e pela amizade.

Ao prof. Dr. Rene Aires, pela utilização do Laser de argônio no laboratório de magneto ótica.

Aos técnicos dos laboratórios, Vanil, Marcos, Ailton, Lirio, Marcão, assim como aos técnicos da oficina mecânica João, Roberto, Jose Menegazo.

Ao Pepo e João, pela leitura desta dissertação.

Ao pessoal da Pólo Informática, Edvaldo, Mario e Marcos Mucheroni, pela amizade.

As secretárias Lia, Vladerez, Rosa, ao Lucas, Adão, Bene e demais pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para este trabalho.

Finalmente ao CNPq , que patrocinou meus estudos desde os tempos de graduação.

- ABSTRACT -

In the present work, we describe the development of photoacoustic microscope. The developed equipment allows to analyse surface and subsurface characteristics of solid materials.

The developed instrument is an one useful equipment for non destructive testing of defects, and other properties of materials. The development of this prototype included the development of a photoacoustical chamber, a Laser scanner, and the interfaces between the physical system and the computer. To control the data aquisition and image generation, a dedicated software was written.

In the developed equipment one sample is put inside a photoacoustical chamber, which provides informations about the thermal and optical properties of the excited region. With the aquired data and its coordinates the computer generates in video a screen with the optical and/or thermal characteristics of the sample.

- RESUMO -

O presente trabalho descreve o desenvolvimento de um protótipo de microscópio fotoacústico, equipamento que permite a obtenção de imagens superficiais e subsuperficiais de materiais sólidos.

O equipamento desenvolvido é útil para teste não destrutivo de materiais. O desenvolvimento do protótipo requereu o desenvolvimento de uma câmara fotoacústica apropriada, um sistema de deflexão x, y para um feixe de Laser, além de uma parte computacional que são as interfaces entre o sistema físico e o computador. O sistema é gerenciado por um programa responsável pelo controle, aquisição de dados e geração de imagem.

No equipamento desenvolvido uma amostra é encerrada no interior de uma câmara fotoacústica, cujo sinal fornece informações sobre as propriedades óticas e térmicas da região excitada da amostra. O computador a partir destes dados e das coordenadas do ponto sobre a superfície da amostra, gera no terminal de vídeo uma imagem da superfície da amostra, através de níveis de cinza.

- ÍNDICE -

RESUMO

CAPÍTULO - I

1.1 - Introdução.....	1
-----------------------	---

CAPÍTULO - II

EFEITO FOTOACÚSTICO

2.1 - Histórico sobre o efeito fotoacústico.....	4
2.2 - Teoria de Rosencwaig e Gersho.....	7
2.2.1 - Casos especiais da teoria.....	14

CAPÍTULO - III

DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA FÍSICO

3.1 - Sistema de imagem fotoacústica (SIFA).....	18
3.2 - Desenvolvimento de uma câmara fotoacústica..	23
3.2 - Desenvolvimento de um defletor de Laser.....	29

CAPÍTULO - IV

INTERFACEAMENTO ENTRE O SISTEMA FÍSICO E O COMPUTADOR

4.1 - Sobre o micro computador.....	32
4.2 - Desenvolvimento da interface.....	36
4.2.1 - Lógica de controle.....	38
4.2.2 - Lógica de endereçamento.....	38
4.2.3 - Interfaces paralelas.....	41
4.2.4 - Conversores digital analógico.....	41

4.2.5 - Conversor analógico digital.....	42
4.2.6 - Conexão digital externa.....	43
4.2.7 - Amplificadores.....	43
4.2.8 - Relógio.....	44
4.2.9 - Lógica de comunicação.....	44

CAPÍTULO - V

DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA DE CONTROLE

5.1 - Processamento de imagem.....	48
5.2 - Características do display.....	50
5.3 - Desenvolvimento do programa.....	51
5.3.1 - Programa principal.....	52
5.3.2 - Programa gerador.....	58

CAPÍTULO - VI

RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Imagens obtidas com a utilização de laser de He-Ne.....	63
6.2 Imagens obtidas com a utilização de laser de Argônio.....	67

CAPÍTULO - VII

CONCLUSÃO.....	76
----------------	----

BIBLIOGRAFIA.....	78
-------------------	----

APENDICE - I

A-I.1 - Testes preliminares com o sistema fotoacústico.....	82
A-I.2 - Teste de linearidade do defletor de feixe de laser.....	85

APENDICE - II

A-II.1 - Diagrama eletrônico da interface desenvolvida para o SIFA	87
A-II.2 - Desenvolvimento da arte final para a interface.....	88

APENDICE - III

A-III.1 - Listagem do programa principal.....	89
A-III.2 - Listagem do programa gerador.....	99

CAPÍTULO - I

1.1 - Introdução

O presente trabalho refere-se ao desenvolvimento de um protótipo de microscópio de fotoacústico.

A microscopia de absorção cada vez mais vem firmando sua eficiência na análise de materiais sólidos [1] [2], pois se trata de uma técnica de teste não destrutivo [3] [4]. Este tipo de equipamento constitui um grande potencial para a análise de propriedades superficiais e sub-superficiais das amostras [5] [6], com aplicações em diversas áreas tais como engenharia [7], biologia [8], e nas áreas industriais de forma geral [9] [10]. A técnica fotoacústica é uma das únicas maneiras de se analisar propriedades sub-superficiais dos materiais [11], podendo ser usada para gerar imagens de trincas e outros defeitos internos [12] ao material que não poderiam ser obtidos por outros métodos não destrutivos.

A técnica de imagens fotoacústicas está ligada à detecção de variações termoelásticas em uma amostra [13]. Em particular, se apenas uma pequena resolução lateral é suficiente e se esta interessado principalmente na variação das propriedades termoelásticas na direção da espessura da amostra, a técnica é usualmente chamada de perfilagem em profundidade " PA deph profiling" [14]. Por outro lado, se uma alta resolução lateral é desejada, a técnica é chamada de microscopia fotoacústica.

As imagens fotoacústicas são obtidas da análise da amplitude ou da fase do sinal. Devido ao equipamento utilizado trabalhamos apenas com a amplitude do sinal fotoacústico

Muitos artigos sobre imagem fotoacústica tem aparecido na literatura [15] [16] [17] [18], desde 1979, quando Rosencwaig [19] propôs a idéia de imagem.

A análise fotoacústica sub-superficial foi demonstrada pela primeira vez em 1977, por von Gutfeld e Melcher [20], que verificaram que buracos existentes sob a superfície de um disco de alumínio podiam influir no sinal fotoacústico e serem detectados por um transdutor sônico.

Porém Wang et al [21] apresentaram o primeiro artigo mostrando imagens fotoacústicas. Em seu experimento um Laser de Argônio foi modulado a uma frequência de 50 a 200Hz, focalizado sobre a superfície de cerâmicas usadas para construção de turbinas. Eles verificaram que as micro trincas existentes no material podiam ser detectadas.

Um método interessante foi proposto por Coufal 1982 [22], que é a geração de imagem fotoacústica usando a transformada de Hadamard [23]. Este método tem duas vantagens em relação ao descrito anteriormente, que são a utilização de uma densidade baixa de potência luminosa, que em certos casos reduz o risco de danificação da amostra e outra vantagem referente a relação sinal ruído na detecção.

No presente trabalho, temos por objetivo o desenvolvimento do suporte mínimo necessário à geração de imagens usando a técnica fotoacústica. As partes fundamentais que constituem o sistema são câmara fotoacústica, posicionador do feixe de laser,

interface com computador e um programa capaz de controlar, fazer a aquisição de dados e gerar as imagens. As diversas partes do sistema são descritas com detalhes nos capítulos que se seguem.

CAPÍTULO - II

EFEITO FOTOACÚSTICO

Neste capítulo, faremos uma breve introdução histórica sobre o efeito fotoacústico, desde sua descoberta acidental por Bell, até suas utilizações como técnica de análise dos materiais.

Mostraremos também o tratamento teórico deste efeito, tal como desenvolvido por Rosencwaig e Gersho e que apesar de relativamente simples permite uma análise detalhada do fenômeno na maioria das situações geralmente encontradas em fotoacústica.

2.1 - Histórico sobre o efeito fotoacústico.

O efeito fotoacústico foi observado pela primeira vez por Alexander Graham Bell em 1880. Na época em que Bell estava pesquisando o telefone ótico. Um de seus transmissores, chamado fotofone, consistia de um espelho que era ativado pelas ondas sonoras da voz (Fig.1.1).

O receptor possuía uma membrana acoplada a um estetoscópio de tal modo que se podia ouvir os sons gerados na mesma. A luz refletida pelo transmissor era então focalizada sobre a membrana de tal modo que se podia ouvir os sons modulados pelo transmissor.

Fig.1.1 Ilustração do fotofone
de Bell.

Para explicar as observações experimentais, Bell sugeriu que a frente iluminada do diafragma era aquecida e resfriada periodicamente em sincronismo com o feixe incidente, e a variação da expansão térmica geraria o som.

Estas explicações foram analisadas por cálculos realizados Lord Rayleigh [24]. Um grande número de publicações sobre este assunto, por Mercadier [25], Tyndall [26], Preece [27], Roentgen [28] e Rayleigh [24] seguiram os trabalhos de Bell.

Mercadier [25] investigou amostras sólidas, líquidas, gasosas e vapores. Ele estava convencido de que o efeito fotoacústico era causado pela absorção da luz no vapor ou no gás que preenche a câmara mas não pelas amostras sólidas ou líquidas. Tyndall [26] também tirou conclusões similares.

Preece [27] estava convencido de que o gás é parte importante na geração do som. A partir de suas observações experimentais ele concluiu que a expansão das amostras não contri-

buia significativamente para para a geração do som.

Quase ao mesmo tempo Roentgen [28] reportou suas observações sobre as oscilações de pressão devido a absorção de luz em vários gases. Ele verificou que a intensidade do sinal acústico gerado diminui quando se aumenta a frequência de modulação da luz.

Nos anos que se seguiram o interesse pelo efeito fotoacústico foi se tornando cada vez menos expressivo. Em nenhum dos trabalhos publicados havia sido dada uma descrição quantitativa satisfatória. O método fotoacústico começava a ser substituído pelos métodos de espectroscopia ótica. O método ficou esquecido até os anos 30 quando Ueingerov fez uma série de experimentos com misturas de gases.

Em 1943, Luff [30] contruiu um medidor de concentração em gases, utilizando efeito fotoacústico. Seu sistema utilizava duas câmaras fotoacústicas em uma configuração diferencial, para minimizar os ruídos gerados na janela e nas paredes da câmara.

Este sistema deu origem a espectrômetros comerciais, que eram capazes de medir concentrações de poucas partes por milhão de CO₂ e N₂, largamente utilizados em desenvolvimento de equipamentos bélicos por volta da segunda grande guerra.

O efeito fotoacústico em sólidos ficou esquecido até 1973, quando foi utilizado por Rosencwaig [30] para obtenção de espectros de Cr₂O₃ em pó e também de soluções de rodamina-B.

A teoria fotoacústica em sólidos vem sendo tratada com modelos crescentemente abranjentes a partir do trabalho pioneiro de Parker [31] em 1973.

Em 1976 Rosencwaig e Gersho [30] desenvolveram um modelo que trata de forma simplificada a perturbação acústica no gás. Este modelo informa o tempo de transito finito de onda de pressão na câmara, considerando que a pressão é a mesma em todos os pontos em cada instante. A variação de pressão é considerada como resultante do fluxo periódico de calor da amostra para uma camada de gás de espessura igual ao comprimento de difusão térmico do gás. A expansão térmica desta camada age como um "pistão acústico" que comprime adiabaticamente o restante do gás gerando assim o sinal fotoacústico.

Ramodt et Al [32] aplicaram uma forma mais completa da equação de transporte térmico no gás, que leva em consideração a velocidade finita do som. Posteriormente Mac Donald e Wetsel [33] estenderam este modelo para incluir os efeitos devido à expansão térmica dos sólidos e a propagação de ondas acústicas neste meio.

Entretanto como a teoria mais simples de Rosencwaig e Gersho fornecem resultados aceitaveis para a maioria das condições experimentais usuais é dela que trataremos em detalhes na proxima seção.

2.2 - Teoria de Rosencwaig e Gersho.

Consideremos uma câmara fotoacústica de diâmetro D e comprimento L , cujo esquema é mostrado na figura 2.1. É suposto que o comprimento L é pequeno em relação ao comprimento de onda acústica de modo que a pressão do gás é a mesma em todos os

pontos em cada instante. A amostra, de diâmetro D , e espessura l_s e um coeficiente de absorção ótica $\beta(\text{cm}^{-1})$, esta montada sobre um suporte de espessura l_b . É também suposto que o suporte, o gás e a janela frontal de vedação (não mostrada) sejam transparentes à luz.

Fig.2.1- Esquema de uma câmara fotoacústica simplificada.

Consideremos ainda as seguintes definições de parâmetros, para o material genérico i ($i=b$ para o suporte, $i=s$ para a amostra e $i=g$ para o gás):

K_i - Condutividade térmica ($\text{cal}/\text{cm s}^\circ\text{C}$)

C_i - Calor específico ($\text{cal}/\text{g}^\circ\text{C}$)

ρ_i - Densidade (g/cm^3)

$\alpha_i = \frac{K_i}{\rho_i C_i}$ - Difusividade térmica (cm^2/s)

$$\alpha_i = \left(\frac{\omega}{2\alpha_i} \right)^{\frac{1}{2}} - \text{Coeficiente de difusão térmica (cm}^{-1}\text{)}$$

$$\mu_i = \frac{1}{\alpha_i} - \text{Comprimento de difusão térmica (cm)}$$

onde ω é a frequência de modulação da luz em radianos por segundo.

Se a intensidade da luz que incide sobre a amostra em sua superfície frontal ($x=0$) é I então a densidade de calor na amostra (onde x é negativo), é:

$$H(x,t) = \frac{1}{2} \rho I_0 e^{\beta x} (1 + \cos \omega t) \quad 2.1$$

considerando que a luz é modulada senoidalmente, que η é a eficiência com que a luz é absorvida e convertida em calor e que a atenuação da luz na amostra obedece a lei de decaimento exponencial de Lambert-Beer,

$$I(x) = I_0 e^{-\beta x}$$

Com estas considerações as equações de difusão térmica nas diversas regiões da câmara podem ser escritas, levando em consideração de que, para a amostra, há a fonte de calor distribuída. Assim para esta região temos:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \theta}{\partial t} - A e^{\beta x} (1 + e^{i\omega t}) \quad 2.2$$

onde $A = \frac{\beta I_0 \eta}{2k} \quad -l_s \leq x \leq 0$

Para as amostras duas regiões ocorrem equações similares mas sem o termo relativo à fonte de calor

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_p} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad -(l_s + l_b) \leq x \leq -l_s \quad 2.3$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_g} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad 0 \leq x \leq l_g \quad 2.4$$

Estas equações estão sujeitas à condições de contorno que garantam a continuidade de temperatura e do fluxo de calor nas interfaces $x=0$ e $x=-l_s$ e que extremidades da câmara em $x=-l_s+l_b$ e $x=l_g$ estejam à temperatura ambiente.

A solução de 2.2, 2.3 e 2.4 com estas condições de contorno fornece-nos a distribuição da temperatura na câmara em termos de seus parâmetros térmicos, óticos e geométricos.

$$\theta_i(\text{interface}, t) = \theta_j(\text{interface}, t)$$

$$k_i \frac{\partial \theta_i(\text{interface}, t)}{\partial x} = k_j \frac{\partial \theta_j(\text{interface}, t)}{\partial x} \quad 2.5$$

$$\Theta_0 = \frac{\beta I_0}{2K_s(\beta^2 - r_s^2)} \left[\frac{(r-1)(b+1)e^{r_s l_s} - (r+1)(b+1)e^{-r_s l_s} + 2(b-r)e^{-\beta l_s}}{(g+1)(b+1)e^{r_s l_s} - (g-1)(b-1)e^{-r_s l_s}} \right] \quad 2.6$$

onde

$$b = \frac{k_b a_b}{k_s a_s} \quad 2.7$$

$$g = \frac{k_g a_g}{k_s a_s} \quad 2.8$$

$$r = \frac{(1+i)\beta}{2a_s} \quad \text{e} \quad r_s = (1+i)a_s \quad 2.9$$

Segundo Rosencwaig-Gersho, a principal fonte de sinal acústico surge do fluxo de calor periódico do sólido para o gás. O processo de difusão periódico produz uma variação periódica da temperatura no gás, dada por:

$$\Theta_{ac}(x,t) = \Theta_0 e^{-r_g x} e^{j\omega t} \quad 2.10$$

A variação de temperatura no gás é obtida tomando a componente real da equação 2.10.

$$T_{ac}(x,t) = e^{-a_g x} [\Theta_1 \cos(\omega t - a_g x) - \Theta_2 \sin(\omega t - a_g x)] \quad 2.11$$

onde Θ_1 e Θ_2 são, respectivamente, as componentes real e imaginária de

$$\Theta_0 = \Theta_1 + i\Theta_2 \quad 2.12$$

A variação de temperatura no gás se extingue a um comprimento de $\lambda_t = 2\pi\mu_g$ e podemos então fazer uma aproximação de que somente a camada de gás, que está em contato com a superfície do sólido e com espessura λ_t , irá responder termicamente às variações de temperatura periódica do sólido.

A temperatura média desta camada, na interface, é dada pela equação:

$$\bar{\Theta}(t) = \frac{1}{2\pi\mu_g} \int_0^{2\pi\mu_g} \Theta_{ac}(x,t) dx \quad 2.13$$

cuja solução é

$$\bar{\Theta}(t) = \frac{1}{2\pi\sqrt{2}} \Theta_0 e^{i(\omega t - \pi/4)} \quad 2.14$$

Devido ao aquecimento periódico da superfície a camada de gás na interface sofre contrações e expansões periódicas e age como um "pistão" acústico, que se propaga no gás e pode ser detectada por um microfone.

O deslocamento deste pistão acústico pode ser

calculado utilizando-se das leis dos gases ideais.

$$\delta x(t) = 2\pi\mu_g \frac{\theta(t)}{T_0} = \frac{\theta_0\mu_g}{\sqrt{2} T_0} e^{i(\omega t - \pi/4)} \quad 2.15$$

Onde T_0 é a temperatura média na superfície com o gás.

Se o restante do gás responder adiabaticamente sob a ação do pistão podemos calcular a variação de pressão do gás na câmara utilizando o princípio:

$$P V^\gamma = \text{CONSTANTE} \quad 2.16$$

Onde P é a pressão do gás na câmara fotoacústica e V o volume do gás no interior da mesma. Nesta equação γ é a relação entre os calores específicos.

Desta forma, a variação de pressão na câmara será dada por:

$$\delta P(t) = \frac{\gamma P_0 \delta x(t)}{l_g} = \frac{\gamma P_0}{l_g} \frac{\theta_0 \mu_g}{\sqrt{2} T_0} e^{i(\omega t - \pi/4)} \quad 2.17$$

onde P_0 é a pressão ambiente. Assim,

$$\delta P(t) = Q e^{i(\omega t - \pi/4)} \quad \text{e} \quad Q = \frac{\gamma P_0 \theta_0 \mu_g}{l_g \sqrt{2} T_0} \quad 2.18$$

A variação de pressão na câmara é dada pela parte

real de $\delta P(t)$.

$$\Delta P(t) = Q_1 \cos[\omega t - \pi/4] - Q_2 \sin[\omega t - \pi/4]$$

2.19

onde Q_1 e Q_2 são as componentes real e imaginária de Q .

Combinando as equações 2.6 e 2.18 temos:

$$Q = \frac{\beta I_0 \gamma P_0}{2\sqrt{2} T_0 K_s l_g \alpha_g (\beta^2 - r_s^2)} \left[\frac{(r-1)(b+1) e^{r s l_s} - (r+1)(b-1) e^{-r s l_s} - 2(b-r) e^{-\beta l_s}}{(q+1)(b+1) e^{r s l_s} - (q-1)(b-1) e^{-r s l_s}} \right] \quad 2.20$$

A equação 2.19 fornece a amplitude e fase da onda de pressão, produzida na câmara, pelo efeito fotoacústico.

Como a expressão para $\delta P(t)$ é difícil de interpretar devido a expressão complicada para Q (eq. 2.20), Rosencwaig e Gersho explicitaram alguns casos especiais que permitem uma interpretação relativamente simples. Este casos são tratados a seguir.

2.2.1 - Casos especiais.

Devido à dificuldade de análise das expressões para a intensidade do sinal fotoacústico gerado em uma câmara, Rosencwaig e Gersho construíram uma tabela na qual são relacionados os casos mais frequentes em fotoacústica, tabela 2.1. A seguir são tratados cada um destes casos separadamente.

Tabela 2.1 - Comportamento de
uma amostra em fotoacústica

Na tabela anterior, μ_s e μ_b são o comprimento de difusão térmica da amostra e do suporte da amostra respectivamente.

Os coeficientes K_s e K_b são a condutividade térmica da amostra e do suporte da amostra respectivamente.

Na tabela 2.1, do lado esquerdo estão representados as amostras transparentes ($\mu_p > l$). Do lado esquerdo estão representados os sólidos opacos ($\mu_p \ll l$). As propriedades térmicas deste conjuntos são.

1.a) $\mu_s \gg l$; $\mu_s > \mu_p$ (sólidos termicamente finos). O sinal fotoacústico é proporcional a βl e tem uma dependência em frequência de ω^{-1} . As propriedades térmicas do suporte da amostra entram na expressão do sinal.

1.b) $\mu_s > l$; $\mu_s < \mu_p$ (termicamente fino).

A expressão do sinal é idêntica ao caso 1.a.

1.c) $\mu_s < l$; $\mu_s \ll \mu_p$ (termicamente grosso).

esta situação o sinal é proporcional a $\beta \mu_s$ ao invés de βl . O sinal varia com $\omega^{-3/2}$.

2.a) $\mu_s \gg l$; $\mu_s \gg \mu_p$ (termicamente fino).

O material é opaco fototermicamente e também opticamente. O sinal, independe de β . Os parâmetros térmicos do material influenciam no sinal, e este varia com ω^{-1} .

2.b) $\mu_s < l$; $\mu_s > \mu_p$ (termicamente grosso).

A expressão do sinal é análoga a 2.a porém os parâmetros

térmicos do suporte são substituídos por aqueles da amostra.

2.c) $\mu_s \ll l$; $\mu_s \ll \mu_p$ (térmicamente grosso).

Neste caso está representado uma situação bastante importante para a espectroscopia fotoacústica. A amostra é óticamente opaca mas fototérmicamente transparente. O sinal é proporcional a frequência de modulação, e varia com $\omega^{-3/2}$.

- CAPÍTULO III -

DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA FÍSICO

Neste capítulo passamos a descrever as principais partes constituintes do protótipo de microscópio fotoacústico desenvolvido, assim como a descrição do equipamento como um todo. São apresentados também diagramas, desenhos mecânicos bem como fotografias ilustrativas do protótipo.

3.1 Sistema de imagem fotoacústica (SIFA)

O protótipo SIFA, consiste de um sistema capaz de posicionar um feixe colimado de laser, sobre a superfície de uma amostra que desejamos analisar. Esta amostra se encontra encerrada em uma câmara fotoacústica, que fornece as informações que são usadas para gerar a imagem fotoacústica da amostra.

O sinal gerado pela câmara fotoacústica é amplificado sincronamente com a modulação do feixe de radiação incidente. No equipamento desenvolvido foram feitos testes com um laser de 2 mW de He-Ne, e também com um Laser de Argônio com potência até 2.5W.

Um computador acoplado se encarrega de controlar o sistema, através de interfaces A/D e D/A. Ele pode posicionar o feixe de laser colimado sobre a superfície e fazer a aquisição do sinal proveniente do amplificador síncrono. Este sinal contém a informação fotoacústica sobre uma determinada posição geométrica

da superfície da amostra em análise.

Com as informações de fotoacústica locais e suas respectivas coordenadas, o computador pode gerar no vídeo uma imagem (tela), representativa daquela superfície. A imagem é gerada atribuindo-se ao valor do sinal local, sobre a amostra, digitalizado um nível de cinza. Este nível de cinza é representado em uma posição correspondente em uma coordenada no terminal de vídeo. A maneira como a geração da imagem é feita será descrita no capítulo IV.

Na fig 3.1, apresentamos um diagrama do sistema de imagem fotoacústica. As fotografias 3.1 e 3.2 ilustram a montagem do protótipo em uma mesa ótica. Neste caso com um Laser de He-Ne.

Fig. 3.1 - Diagrama do sistema de imagem fotoacústica

Foto 3.1 - Sistema fotoacústico
montado em bancada ótica.

Foto 3.2 - Outra vista do SIFA
mostrando a câmara.

3.2 - Desenvolvimento de um câmara fotoacústica

A câmara fotoacústica é o elemento fundamental neste sistema, pois é responsável pela transdução do sinal fotoacústico.

Existem várias maneiras de detecção dos efeitos causados pela variação de temperatura de amostras. Tais como um microfone de eletreto, transdutor piezoelétrico [35], deflexão de feixe de laser [9], e outros.

Em nosso caso, optamos pela detecção por microfone de eletreto devido a sua sensibilidade e facilidade de ser encontrado. Este tipo de microfone já possui um preamplificador interno constituído por um transistor FET, o que facilita seu acoplamento a outros circuitos amplificadores.

As câmaras desenvolvidas no laboratório de luminescência do IFQSC, [34] [35], não serviam para nosso propósito, uma vez que desejávamos analisar amostras de dimensões superiores as das câmaras existentes.

Isto nos levou ao desenvolvimento de uma nova câmara fotoacústica. Para este desenvolvimento foram levados em consideração parâmetros tais como o volume da câmara, blindagem ao ruído exterior e sensibilidade. Destes itens apresentados apenas um foi sacrificado em relação às câmaras existentes: a sensibilidade. Pois a sensibilidade está diretamente ligada ao volume da câmara [36].

Uma blindagem eficiente da câmara foi conseguida,

através do uso de paredes espessas e anéis de vedação do tipo O-Ring entre a janela e o corpo da câmara. A janela da câmara foi construída em vidro BK-7, com uma espessura de 2,0mm.

Na figura 3.2, podemos ver o desenho mecânico da câmara desenvolvida. As fotografias 3.3, 3.4 e 3.5 mostram a câmara já implementada. No apêndice I são apresentados alguns testes realizados com a câmara fotoacústica desenvolvida.

Escala 2:1
Material: Latão

Fig. 3.2 - Desenho mecânico da câmara fotoacústica.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO USP-IFQSC-DFCM

Laboratório de Instrumentação Eletrônica - LIE

Proj: Rossi

Des: Maria B. Souza São Carlos, 07 de Dez. de 87

Foto 3.3 - Vista frontal da
câmara fotoacústica.

Foto 3.4 - Vista traseira da
câmara fotoacústica.

Foto 3.5 - Vista da câmara fotoacústica
acoplada ao sistema

3.3 - Desenvolvimento de um defletor de laser.

O defletor laser é a parte do sistema, destinada ao posicionamento do feixe sobre a superfície da amostra encerrada na câmara fotoacústica.

Existem várias formas de posicionamento de feixe, tais como defletores ou de motores de passo. Grande parte dos trabalhos da literatura [37], o feixe de laser é fixado e a câmara é montada em uma mesa x,y, que por sua vez é controlada pelo computador através de motores de passo. Esta forma de posicionamento é problemático, pois o deslocamento mecânico através de motores gera ruído na câmara; além disto a velocidade com que podemos varrer a superfície da amostra é bastante limitada.

Em nosso protótipo o elemento de posicionamento do feixe de laser foi desenvolvido apenas para uma implementação preliminar no sistema. E optamos por fixar a amostra e defletir o feixe, para aliar a alta velocidade de varredura da superfície e imunidade a ruídos.

O defletor desenvolvido consiste, como mostrado na fig. 3.3, de dois espelhos posicionadores, que refletem o feixe incidente. Estes espelhos são então acionados por pequenos solenoides. Como acionadores utilizamos bobinas de autofalantes. Como o ângulo de deflexão é pequeno a não linearidade destas bobinas não influi demasiadamente. No apêndice I.2 são mostrados as curvas de linearidade dos defletores.

Fig. 3.3 - Diagrama esquemático do defletor de feixe Laser.

A partir desta montagem, controlando a corrente nas bobinas "x,y" do defletor, podemos posicionar o feixe sobre a superfície da amostra encerrada na câmara.

Os dois espelhos são acoplados às bobinas através de cola de silicone, que apresenta uma constante elástica baixa, permitindo uma flexibilidade grande do espelho. As bobinas por sua vez são montadas em uma plataforma (base), e fechadas por uma tampa de alumínio, possuindo apenas orifícios para entrada e saída do feixe a ser defletido.

Este conjunto foi montado em um trilho de uma bancada ótica, (veja foto 3.5), e conectado ao computador.

Foto 3.5 - Ilustração do defle-
tor de feixe de Laser (Base).

- CAPÍTULO IV -

INTERFACAMENTO ENTRE O SISTEMA FÍSICO E O COMPUTADOR

Este capítulo é destinado à descrição do circuito ou mais especificamente, da interface entre o computador e o protótipo do sistema fotoacústico (SIFA).

A interface tem a finalidade de proporcionar ao computador fazer a interação com o sistema de imagem, atuando no controle de deflexão do feixe de laser. Através destas interfaces são feitas as aquisições de dados, a partir de um amplificador síncrono. Informações estas que permitirão, através de um programa, gerar uma imagem da amostra em análise.

São apresentados diagramas em blocos do circuito eletrônico e a descrição detalhada do funcionamento de cada uma de suas partes. São apresentados também fotografias que ilustram a implementação inicial do protótipo.

4.1 - Sobre o microcomputador.

Antes de iniciarmos a descrição da unidade de interfacamento SIFA, achamos conveniente algumas palavras sobre o computador escolhido para o desenvolvimento desta interface.

Um computador que possuísse as características necessárias ao nosso propósito, para o desenvolvimento de uma

interface, levou-nos a escolha de um microcomputador compatível com o "IBM Personal Computer - IBM-PC" [38] [39].

Do ponto de vista de programação estas vantagens são enormes pois podemos fazer uso de linguagens mais aprimoradas, para o tratamento gráfico. Além disto as possibilidades de armazenamento de dados também são maiores onde podemos fazer uso de disco rígido (winchester) [40].

Do ponto de vista do hardware, um PC possui recursos [41] que em um aperfeiçoamento do sistema fotoacústico trará várias vantagens, tais como velocidade maior para aquisição de dados e controle devido ao relógio do micro ser mais rápido, DMA para utilização na aquisição, relógio em tempo real, além de memórias maiores e interrupção.

O 8088 é um microprocessador de 16 bits que controla os computadores do tipo PC [42]. Ele é a unidade central de processamento (UCP). Os bits de dados que entram e saem da máquina devem passar pela UCP para serem processados ou redirecionados.

O 8088 controla as operações básicas [43] do computador enviando sinais de controle, endereços de memória, dados de uma parte do computador a outra, através da rede que interconecta estas partes chamada de barramento. Localizada ao longo do barramento estão as portas de entrada ou saída (I/O) que conectam vários circuitos integrados de suporte ao barramento e podem ser usadas para acesso a dispositivos externos ao computador tais como interfaces.

Dentro do 8088 existem 14 registradores trabalhando, [44] para transferência de dados e processamento. Estes registra-

dores internos formam uma área de 28 bytes e funcionam como armazenadores temporários de dados endereços de memória apontadores de instruções e controladores de "status" e "flag". Através destes registradores, o 8088 pode acessar mais de um milhão de bytes de memória e mais de 64 mil portas de I/O. Todas estas características que apresentam os PC compatíveis, torna as máquinas bastante eficientes e funcionais.

A unidade de interfaceamento, desenvolvida para o sistema fotoacústico, é acoplada diretamente ao conector do barramento [45] de I/O do computador. O PC possui um conector de 62 pinos nos quais estão os sinais destinados ao controle e endereçamento de periféricos. Estes sinais são apresentados a seguir.

Sinais referentes ao computador.

A0-A19: Canais de saída. Endereça os bits 0 até 19. Estas linhas são usadas para endereçar a memória e os dispositivos I/O dentro do sistema.

AEN: Saída de habilitação de endereço. Esta linha é usada para desativar o microprocessador e outros dispositivos quando for utilizado DMA. Quando esta linha for alta, o controlador do DMA acessa o endereçamento da memória, lê e escreve na memória.

ALE: Saída de sinal para endereço de habilitação do Latch.

CARD SLCTD: Sinal de entrada. Esta linha é ativada para o cartão de expansão nos slots.

CLK: Sinal de saída. Com uma frequência de 4.77 MHz.

D0-D7: Entrada e saída de dados.

DACK0-DACK3: Saídas de reconhecimento de DMA.

DRQ1-DRQ3: Entradas. Linhas para requisição automática dos periféricos durante a operação DMA.

I/O CH CK: Entrada. Canal de verificação. Esta linha fornece ao microprocessador informação de paridade na memória ou dispositivo.

I/O CH RDY: Esta linha de entrada seleciona se é para ler ou escrever.

IOR: Este sinal é somente de saída. É usado para instruir os dispositivos de entrada / saída.

IRQ2-IRQ7: Entrada, Requisição de interrupção de 2 até 7.

MEMR: Saída, sinal de comando para memória de leitura.

OSC: Saída do oscilador (14.31818MHz).

T/C: Terminal de contagem para o DMA.

POWER e TERRA: Possui ainda entre os pinos, a alimentação (+5V, -5V, +12V, -12V) e uma linha de terra.

4.2 - Desenvolvimento da interface.

O desenvolvimento de um projeto de hardware envolve uma definição das necessidades do circuito [46]. Assim, foram definidos alguns parâmetros correspondentes, tais como número de entradas e saídas, tipo de interfaceamento, conexão, etc. Estas características principais são:

- 1 - Acoplamento simples no slot do computador.
- 2 - Endereçamento da interface programado por chaves, o que permite a utilização de varias unidades em um mesmo computador e a mudança de endereçamento da unidade.
- 3 - Conexão externa através de conectores tipo DB-25 e BNC para as entradas analógicas.
- 4 - Conversores A/D de oito Bits, com tempo de conversão de 100us destinada a aquisição de dados.
- 5 - Duas saídas digitais analógicas de oito Bits cada, possuindo etapas de potência, destinada ao acionamento dos defletores.
- 6 - Dito conexões digitais bufferizadas, programáveis para entrada ou saída.

Uma vez definidas as características, a interface apresenta a forma como podemos ver na fig 4.1, na qual é apresentado um diagrama em blocos. De tal modo que cada bloco desempenha uma função específica dentro do circuito as quais passamos a descrever.

Fig.4.1 - Diagrama em blocos da interface do SIFA.

4.2.1 - LÓGICA DE CONTROLE -

Representa o controle da interface. Este controle é feito pelo sinais enviados pela UCP do computador, tais como RESET, IOR, IOW, AEN, além dos endereços A0, A1, A4, A5 e A6. Todos estes sinais são bufferizados (74LS244) [48], sendo aplicados então ao decodificador de endereço, que vai gerar a seleção da interface paralela (74LS138) [48].

4.2.2 - LÓGICA DE ENDEREÇAMENTO -

Este bloco lógico apesar de ser chamado de endereço (Fig 4.2), apresenta funções também de controle, do ponto de vista do acionamento de outros pontos do circuito (interfaces paralelas). Os endereços correspondentes a A12 até A19 do barramento são aplicados a comparadores do tipo 74LS85 [48], e comparados com 00 Hex.

O sinal resultante desta comparação juntamente com o sinal AEN [49], que é a liberação do DMA do processador, gera na porta G2A do 74LS138, a habilitação deste componente.

Ainda referente ao endereçamento, temos a comparação dos endereços A8 até A11, com endereços programados em uma chave de seleção (dip-switch). Nesta comparação é utilizado o integrado 74LS136 [48]. Novamente o estabelecimento da condição dada pelo chave gera um sinal de liberação do decodificador de endereços (G1- 74LS138) .

A finalidade da chave nesta unidade, é permitir que em um mesmo computador possamos utilizar duas ou mais unidades idênticas a estas. Para isto programando cada uma delas em um endereço diferente. Como veremos no capítulo seguinte o programa do SIFA, foi desenvolvido para o endereçamento 0500 Hex, pois esta é uma região de acesso livre para um PC compatível.

O endereçamento dos respectivos controles da unidade, podem ser vistos com maior clareza na fig. 4.2. Neste são representados os sinais de endereçamento e a maneira como estes devem ser acionados pelo software para o controle da interface.

CONTROLE DE INTERFACE

Fig. 4.2 - Endereçamento da unidade de interfaceamento SIFA.

4.2.3 - INTERFACES PARALELAS -

Estes são circuitos do ponto de vista funcional idênticos entre si. São constituídos por uma unidade de interfaceamento paralelo ou PPI, do tipo 8255 [49].

Este circuito integrado possui características tais, que nos permite programar seus três portos paralelos Pa, Pb, Pc, para entrada ou saída de dados conforme a necessidade.

Cada um destes portos possuem registradores (latch enable), que permitem a retenção de um dado. De tal modo que um dado pode ser enviado do barramento para estes portos ou vice-versa.

No projeto desenvolvido a unidade 1 (interface paralela 1), é usada para fazer o interfaceamento entre o computador e os defletores através de conversores digital analógicos. A unidade 2 é usada para fazer aquisição de sinais através dos conversores analógico digital. O porto Pb desta unidade é usado para fazer o controle do conversor analógico digital, e o porto Pc, para controle e aquisição de sinais digitais.

4.2.4 - CONVERSORES DIGITAL ANALÓGICOS -

Como conversores D/A (digital analógico), foram usados os integrados MC1408 [50] da motorola, que apresentam um tempo de conversão da ordem de 10 μ s. Optamos por oito bits para um desenvolvimento preliminar do SIFA, pois este nos permite uma

resolução em numero de pontos de 256X256. Naturalmente em um etapa posterior de desenvolvimento, na qual o uso de defletores profissionais, podemos substituir os D/As de oito bits, por D/A de doze bits do tipo por exemplo AD574.

Para esta implementação podem ser usados os oito bits do porto Pc da PPI-1 que não estão sendo utilizados.

4.2.5 - CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL -

Este circuito é o responsável pela aquisição de dados do sistema. É constituído por um conversor analógico digital de oito bits, multiplexado em oito entradas o ADC0808 [51] da National. Este conversor utiliza o método de conversão por aproximação sucessiva (SAR). Sendo que possui um tempo de conversão da ordem de 100uS. Este tempo é suficiente para as necessidades do sistema uma vez que as frequências de modulação do laser usadas são baixas, não exigindo alta velocidade de conversão.

O numero de oito bits para conversão nesta aplicação é ideal. Pois nos permite uma resolução de 256 níveis do sinal, proveniente do material em análise. O olho humano consegue distinguir [52] somente 40 níveis de cinza, de modo que como veremos no capítulo seguinte, o programa gerador de imagens foi desenvolvido para gerar inicialmente apenas 16 níveis de intensidade na tela. O que é feito dividindo os 256 níveis proporcionados pelo A/D em 16 faixas.

Este conversor, necessita de um gerador de relógio (clock) externo. Neste projeto foi usado o próprio sinal de

relógio do micro computador, que é de 4.77 MHz, sendo dividido por oito. Assim o conversor trabalha com uma frequência em torno de 500KHz.

Os controles do conversor A/D são feitos através do porto Pb da PPI-2. Entre os controles necessários a seu funcionamento, estão os endereços A0, A1 e A2, destinados à seleção das entradas do conversor. Além dos sinais de START-ALE, que inicializam a conversão e EOC (End Of Conversion) que sinaliza o final da conversão. Existe ainda no conversor a entrada OE (Output Enable) que libera o dado convertido para o barramento.

4.2.6 - CONEXÃO DIGITAL -

O bloco oito foi implementado no protótipo, mas não está sendo usado. É constituído por um buffer 74LS244, sendo destinado a fazer a comunicação dos dados do porto Pc da PPI-2 com o meio externo. Tem por função fazer o controle e aquisição de sinais digitais, que podem ser usados para o controle de moduladores eletro-óticos, relés motores de passo etc.

4.2.7 - AMPLIFICADORES -

Estes blocos são destinados a amplificar o sinal gerado nos conversores D/A, e aplicá-los aos defletores. Como amplificadores de sinal foi usado o amplificador operacional 741 [51], em configuração não inversora. O amplificador possui um potenciômetro do tipo trimmer, que permite o ajuste do ganho e

portanto o nível de sinal que será aplicado sobre o defletor.

O sinal amplificado é então aplicado a transistor na configuração base comum, que funciona como um amplificador de corrente. O sinal a ser aplicado no defletor é tomado em relação ao emissor e o terra do circuito, na versão fonte de corrente. Para isto um transistor do tipo BD139 [52] é utilizado, este possui uma resposta bastante rápida (Frequência de corte 200MHz) e suporta uma corrente de dois Ampéres.

4.2.8 - RELÓGIO -

Este bloco é simplesmente um gerador de relógio para o conversor A/D. é constituído pelo circuito integrado 74LS161 [48]. No protótipo implementado este faz a divisão do sinal de relógio do computador como. No lay out projetado para esta interface foi colocado um (dip switch), o qual a mudança da divisão de frequência por 16, 8, 4 e 2. Isto permite compatibilizar a interface com microcomputadores cuja frequência sejam diferentes de 4.77MHz, tais como PC turbo ou AT.

4.2.9 - LÓGICA DE COMUNICAÇÃO -

Este último bloco é o responsável pela comunicação de dados entre o computador e a interface. Ou seja é um "buffer" bidirecional "triestate" do tipo 74LS245 [48], que conecta o barramento de dados do computador com as PPIs. A direção do "buffer" é dada pela linha de RD, e o "enable" é dado por um

sinal gerado pelo controle da interface. O diagrama eletrônico desta interface, pode ser visto no apêndice II. Um LED (Diodo Emisor de Luz) foi acoplado ao protótipo também, para permitir uma verificação rápida de sua alimentação correta.

Não estão representados no diagrama em blocos, as alimentações do circuito, que são feitas pelo próprio barramento do computador. Dois reguladores de tensão do tipo 7805 e 7812 são usados para fornecer as tensões de referência aos conversores. As fotografias 4.1 e 4.2 ilustram respectivamente o protótipo da interface e seu acoplamento ao computador.

Foto 4.1 - Ilustração do protótipo da interface em wire-wrap.

Foto 4.2 - Placa de interface
acoplada ao computador.

- CAPÍTULO V -

DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA DE CONTROLE

Passamos a descrever neste capítulo o desenvolvimento do programa destinado a gerenciar o sistema de imagem fotoacústica (SIFA), assim como o programa gerador. Este último destinado à geração da imagem a partir dos dados coletados no sistema fotoacústico.

Inicialmente faremos uma breve revisão sobre os processos usados para mapeamento e processamento de sinais para geração de imagens. Apresentando posteriormente a descrição do programa principal do sistema e do programa gerador propriamente dito. Serão apresentados diagramas em bloco. As listagens dos programas em fonte serão apresentadas então no apêndice III.

5.1 - O processamento de imagem.

Muitos são os equipamentos que envolvem o processamento digital de imagens, tais como radares, tomógrafos, microscópios eletrônicos [54], etc. Em geral um sistema de display de uma imagem envolve um sistema de controle e aquisição de dados, respectivos ao objeto ao qual se deseja gerar uma imagem. E ainda

um sistema capaz de transformar estes sinais em uma imagem compreensível, pelo homem, que representa aquele objeto.

O display de uma tela envolve o envio para um terminal de vídeo ou controlador de vídeo, das coordenadas de um ponto e sua respectiva intensidade [55]. Desta forma na tela de um monitor (CTR) o feixe de eletrons gera um ponto luminoso correspondente as informações recebidas pelo controlador. Este ponto gerado na tela do monitor de vídeo é chamado de pixel [56].

A formação de uma imagem no vídeo envolve um definição de contrastes no vídeo (Display). Nos modelos de construção de imagens podemos então obter o contraste, que define as formas das imagens, como monocromático ou policromático em uma situação mais aperfeiçoada do equipamento gerador. Neste ultimo caso, policromático, os sinais são enviados na forma RGB (Red Green Blue) para o dispositivo de display, atribuindo se aos pixels suas cores correspondentes.

No caso de imagens monocromáticas o contraste é obtido variando-se a intensidade do ponto luminoso ou o nível de cinza. Em vídeos onde não podemos variar a intensidade dos pixels, é usada uma técnica combinatória [52], onde as intensidades são obtidas pela combinação de pontos acesos e apagados. A combinação é tal que proporciona ao operador do sistema uma ilusão de níveis de cinza.

5.2 Características do display.

Quanto às características de display de uma imagem temos dois pontos importantes. O primeiro diz respeito ao tamanho físico do monitor o que pode influenciar na resolução final de uma imagem, ou pelo menos na facilidade de visualização. O segundo é o tamanho digital da imagem, que o display pode suportar. Ou seja o número máximo de pontos com os quais podemos trabalhar, pois certamente um display possui um número fixo de linhas e amostragens por linha. No processamento de imagens atualmente são exigidos um número cada vez maior de pixels. Desta forma um display inadequado pode reduzir significativamente a eficiência de uma instalação de geração de imagens.

Este motivo nos levou também à escolha de um PC compatível, como computador para o processamento de imagens. O módulo básico de um PC possui uma unidade CGA (Color Graphic Adapter), que permite uma resolução máxima de 640X200 pontos.

Um particular interesse é o número de níveis de cinza discretos que o sistema pode gerar. Este particularmente depende do número de bits usados para controlar o brilho de cada "pixel". Alguns sistemas são capazes de atuar sobre 4 bits, produzindo 16 níveis de cinza distintos [56], enquanto outros operam com 8 bits, para 256 níveis de cinza.

No caso do PC, 8 bits são usados para controle do display. Entretanto este não pode resolver 256 níveis, pois estes bits são usados para controle também dos sinais RGB. O "Byte" usado, no controle de vídeo pelo PC, pode ser visto na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Sinais de controle gráfico do IBM-PC.

7 6 5 4 3 2 1 0								USO DO BIT
1	.	.	.	.	.	.	.	- Piscar o fundo no modo caracter.
.	1	.	.	.	.	.	.	- Vermelho fundo.
.	.	1	.	.	.	.	.	- Verde fundo.
.	.	.	1	.	.	.	.	- Azul fundo.
.	.	.	.	1	.	.	.	- Intensidade do fundo.
.	.	.	.	.	1	.	.	- Vermelho antefundo.
.	.	.	.	.	.	1	.	- Verde antefundo.
.	.	.	.	.	.	.	1	- Azul antefundo.

De tal modo que no programa desenvolvido para a geração de imagens, os níveis de cinza são gerados pela combinação de pontos acesos ou apagados, uma vez que optamos pelo modo monocromático, para uma implementação inicial do programa.

5.3 Desenvolvimento do programa.

O programa do sistema de imagem fotoacústica se divide em duas partes distintas que são o programa principal, e o programa gerador de imagens propriamente dito.

O programa foi desenvolvido em linguagem Pascal [57], e as rotinas que fazem a interação com a interface diretamente, foram feitas em linguagem montadora [34], para controle da inter-

face SIFA, estas rotinas em assembler são introduzidas no programa através do comando INLINE [58].

5.3.1 - Programa principal.

Chamamos aqui de programa principal um programa que é transparente [59] ao usuário, mas que o faz utilizar o equipamento de geração de imagem através da apresentação de "menus" de aplicação. O programa principal faz o gerenciamento dos recursos que o sistema apresenta.

O usuário do SIFA (Sistema de Imagem Foto Acústica), tem a facilidade de atuação através de um Menu principal, que possui cinco itens, cada um deles acessando subitens. De tal forma que uma vez carregado o sistema operacional [60] do computador no caso o MSDOS 3.1, o usuário deve introduzir o diskete contendo o programa e chamá-lo SIFA.COM.

O procedimento anterior deve ser feito certificando que a placa de interface do sistema esteja conectada devidamente no slot do computador. Aparecerá então na tela do monitor uma abertura, após a música de entrada o usuário deve pressionar qualquer tecla, este procedimento fará o acesso ao menu principal, aparecendo na tela os seguintes itens (Veja Foto 5.1).

Item A - A chamada deste item faz o sistema começar a funcionar, e a aquisição de dados é inicializada com a formação da imagem da amostra em teste diretamente na tela do monitor. Este processo é contínuo e fará a geração de toda a tela até o

fim, a menos que qualquer tecla seja pressionada. O que interromperá a aquisição de dados e fará o programa voltar ao menu principal.

Foto 5.1 - Mostra o terminal de vídeo no menu principal.

Item B - No caso de geração de uma imagem este deverá ser o primeiro item do menu a ser chamado, pois é neste que faremos a introdução dos parâmetros desejados de cada imagem. A chamada deste menu acessará três novos sub-ítems, que são:

B-1) Neste sub-item o usuário deverá digitar no nome e nome do arquivo com o qual a imagem gerada deverá ser gravada no disquete. Exemplo TESTE.PIC, etc.

B-2) O usuário deverá digitar nome ao qual ele se referirá a aquela imagem, este nome simbólico aparecerá gravado na própria tela de imagem no canto esquerdo superior, quando esta for solicitada no vídeo ou em uma impressão.

B-3) Este sub-item é destinado a introdução da frequência de modulação com a qual o feixe de laser é pulsado sobre a amostra. Este valor deverá ser dado em Hertz sendo utilizado para o controle do tempo de aquisição em cada ponto sobre a superfície da amostra.

* A falta de qualquer dos itens acima causa a interrupção do programa.

Item C - Testes na interface, este item fará o acesso de sub-itens que são destinados a testes no sistema de aquisição assim como no sistema físico antes de começar o processo de aquisição de dados propriamente dito. Os sub-itens são:

C-1) Destinado a escrever um número nos conversores

D/A, sua chamada acessa:

C-1.1) Número do conversor (1 ou 2), que se deseja escrever um dado (Byte).

C-1.2) Executa a escrita.

C-1.3) Volta ao menu C-1.

C-2) Este item é destinado a leitura de um número do

A/D apresenta também sub-itens que são:

C-2.1) Lê o dado do conversor, cada vez que uma tecla é pressionada.

C-2.2) Lê o conversor continuamente e apresenta uma listagem no vídeo dos valores lidos.

C-2.3) Volta ao sub-menu C-2.

C-3) Este sub-menu é uma ferramenta útil para o usuário pois permite a geração de uma mira, ou seja o feixe de a laser é defletido pelo sistema de varedura de tal forma que se forma sobre a superfície da amostra um retângulo do tamanho da região da superfície da mesma que será mapeada. Isto permite que a câmara foto-acústica que encerra a amostra seja posicionada através de mesa X,Y de micrômetros na posição onde se deseja obter a imagem qualquer tecla pressionada faz a mira parar.

C-4) Faz o retorno ao menu principal.

Item D - Tratamento da imagem, a chamada deste procedimento permitirá o acesso de três subitens que são.

D-1) A através deste procedimento pode se recarregar uma imagem do disco rígido ou disco flexível, mediante o fornecimento do seu nome.

D-2) Por este procedimento pode-se imprimir uma imagem fornecendo seu nome. Antes de se entrar neste sub-item é necessário verificar se a impressora, que deve ser gráfica, esta corretamente ligada, pois caso contrário poderá causar a interrupção do programa.

Item E - Este item faz sair do programa para o sistema operacional.

O diagrama em blocos da fig 5.1, representa as diversas fases deste programa. Todo o programa foi desenvolvido com a utilização da linguagem Pascal Turbo. E o pacote Turbo Graphics [61] foi utilizado para a abertura de janelas nos diversos menus que aparecem na tela ao longo da utilização do programa. A listagem do programa principal se encontra anexo ao apêndice II.

No programa principal são definidas também as constantes do programa tais como os endereços dos portos de acesso a interface, assim como de controle do mesmo. São também definidas as variáveis como a matriz (SINACUSTICO), e outras necessárias ao controle e aquisição de dados no programa gerador.

Fig. 5.1 - Diagrama em blocos do programa principal.

5.3.2 - Programa gerador.

O programa gerador é responsável pela aquisição de dados e geração de imagem da amostra em análise. Este programa é acessado como um procedimento (GERADOR), da opção A do menu programa principal. A entrada neste procedimento exige que as variáveis DESTINO, NOME e FREQUÊNCIA estejam definidas. Estas variáveis são respectivamente o nome da fila onde deve ser gravada a imagem gerada, o nome da imagem (Rótulo) e a frequência de modulação do Laser, introduzido no item B do programa principal.

São utilizadas para a geração de níveis de cinza uma combinação de pontos acesos e apagados. De tal modo que obtemos 16 níveis de cinza correspondentes à tabela 5.2.

A geração destes níveis de cinza esta baseada na distribuição Gaussiana [52] da propria intensidade de cada ponto. Onde a intensidade total ,de cada ponto é dada pelo número de pontos acesos e apagados e de sua distribuição no conjunto. Na figura 5.3, podemos ver o padrão de intensidades usado. Esta figura foi obtida por simulação de níveis de intensidade de e impressa em impressora gráfica através do menu D-2 do programa principal.

Fig. 5.2 - Padrão de intensidades gerados por simulação.

Tabela 5.2 - Representação dos níveis de cinza gerados.

Para a obtenção dos pontos correspondentes aos níveis de cinza, foram gerados dezesseis procedimentos N1...N16, que desenha na tela o ponto correspondente à combinação (Tabela 5.2). Esta geração foi possível através da utilização do comando DP(x,y), do pacote Turbo Graphics, utilizado para desenvolvimento desta parte do programa [62]. Este comando desenha um ponto na coordenada (x,y) na tela do vídeo no modo de alta resolução do PC (640x200 pontos).

O programa gerador delimita uma janela, no interior da qual será gerada a imagem. A partir daí basicamente três procedimentos fundamentais são usados para a aquisição dos dados e geração da tela:

1) PROCEDIMENTO POSICIONA: é basicamente um controlador da posição geométrica. Este procedimento posiciona o feixe através dos defletores de laser e chama o procedimento seguinte.

2) PROCEDIMENTO AQUISIÇÃO: Responsável pela aquisição de dados, uma vez o laser posicionado sobre a superfície da amostra encerrada na câmara, é iniciada a aquisição de dados. Para uma maior confiabilidade nos dados e como a velocidade de aquisição por ponto é baixa foi decidido se fazer cinco aquisições por ponto sendo o resultado a média aritmética destes sinais. Uma vez feita a aquisição e a média este valor é carregado em uma posição da matriz (SINACUSTICO), cujo índice I,J já foi incrementado no procedimento anterior posiciona.

3) PROCEDIMENTO PLOTA: Após a aquisição de dados, temos condição de lançar este valor na tela através de um nível de cinza. O procedimento PLOTA determina a faixa de 0 a 256 em que o sinal se encontra e aciona um dos procedimentos N1...N16, juntamente com a coordenada de onde aquele sinal é proveniente. Isto fará com que um ponto da imagem seja desenhado no video.

Um diagrama em blocos do programa gerador, pode ser visto na figura 5.3. No qual são mostrados os procedimentos descritos anteriormente.

Um "loop" fechado faz com que toda a superfície da amostra seja varrida e a imagem é gerada, então através dos procedimentos anteriores. A cada ciclo do "loop" as posições geométricas são incrementadas e comparadas se é o final ou não. Além disto o teclado também é testado pois o operador do sistema pode eventualmente desejar interromper o processo de geração da imagem. No dois caso quando o operador interrompe ou quando é realmente o fim da aquisição, a matriz (SINACUSTICO) contém os dados referentes a imagem. E a tela é salva em disco, com o nome inicialmente fornecido (Variavel NOME). Uma vez salvo o programa volta ao menu principal.

As listagens dos programas em fonte, PRINCIPAL e do GERADOR, encontram-se no apêndice III.

GERADOR DE IMAGENS

Fig. 5.3 - Diagrama em blocos do programa gerador.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Passamos a descrever neste capítulo alguns dos resultados obtidos na análise de amostras especialmente preparadas, através do protótipo de microscópio desenvolvido.

Estes resultados serão divididos em duas partes, os obtidos com Laser de He-Ne e com Laser de Argônio de potência mais elevada.

Serão apresentados como resultados as próprias imagens obtidas, e impressas pelo programa SIFA.

6.6 - Imagens obtidas com a utilização do laser de He-Ne.

Para os primeiros testes de imagem fotoacústica utilizamos um laser de He-Ne de 2mW. Foram geradas duas imagens de uma cruz de material negro (carbono), impresso em um papel branco, utilizando várias frequências de modulação da luz, para uma verificação do desempenho. Estes resultados podem ser vistos nas fig. 6.1 e 6.2.

Para estas imagens foi usado uma colimação do feixe, da ordem de 50 μ m, e frequências de modulação de 25Hz e 30Hz respectivamente para as imagens 6.1 e 6.2. É importante lembrar que o tamanho da imagem gerada depende da abertura do ângulo de defle-

xão, que pode ser variado no próprio defletor através de potenciômetro, para os ângulos na direção x e direção y. A abertura máxima conseguida é de 2.2 graus (Teste de deflexão apêndice I.2).

A resolução do sistema em número de pontos é de 128x64 pontos, de acordo com o programa gerador e a matriz de intensidade de níveis de cinza. Naturalmente que este número pode ser estendido a 256x200, com a implementação de defletores de precisão, sem nenhuma modificação no circuito de interfaceamento.

A cruz que aparece nas figuras tem uma dimensão de 2.0x2.0 mm. e a abertura da região de varredura tem aproximadamente 4.0x3.8 mm. Esta região de varredura, que corresponde a região onde será mapeada a superfície, pode ser verificada antes da aquisição de dados, para efeito de posicionamento da amostra através da mesa x,y onde se encontra instalada a câmara fotoacústica. Este procedimento pode ser feito através do menu aplicativo "C-3 - GERADOR DE MIRA" do programa SIFA.

Podemos verificar através desta imagem também, que a não linearidade do defletor (Apêndice I.2), não ocasionou uma distorção muito grande na imagem.

Na fig. 6.2 verificamos flutuações do sinal, isto se deve a amplificação do sinal fotoacústico. Uma vez que a frequência de modulação foi aumentada, a intensidade instantânea sobre cada ponto da amostra cai. Fazendo com que o sinal fotoacústico gerado também caia, necessitando de uma maior amplificação diminuindo assim a relação sinal ruído.

Fig. 6.1 - Cruz de carbono em papel.

Dimensões da amostra - cruz 2.0 x 2.0mm

Dimensões do campo da imagem - 4.0 x 3.5mm

Parâmetros da imagem:

Frequência de modulação do feixe de laser - 20 Hz

Potência do laser - 2mW

Amplificação - 25uV

Ângulo de fase no lock-in - 90 graus

Fig. 6.2 Cruz de carbono em papel.

Dimensões da amostra - cruz 2.0 x 2.0 mm

Dimensões do campo da imagem - 4.0 x 3.5 mm

Parâmetros da imagem:

Frequência de modulação do feixe de laser - 30Hz

Potência do laser - 2mW

Amplificação - 25uV

Ângulo de fase no lock-in - 90 graus

6.2 - Imagens obtidas com a utilização de laser de Argônio.

Uma das principais características do efeito fotoacústico, é o de permitir a verificação de defeitos internos aos materiais opacos. Desta forma a grande aplicação, desejada, do protótipo de microscópio desenvolvido é a verificação de defeitos ou imperfeições que se encontram abaixo da superfície do material em análise.

A profundidade de difusão da onda de calor no material, é função da frequência de modulação da fonte luminosa. Em nosso sistema foi necessário a utilização de um laser de Argônio com maior potência para verificação de propriedades sub-superficiais das amostras.

Foram analisadas várias amostras contendo defeitos, tais como um disco de alumínio de 3.0 mm de diâmetro por 2.0 mm de espessura, possuindo um furo na direção de seu diâmetro. Este furo nos serviu como um defeito conhecido sob a superfície. Foram testadas também, amostras de latão contendo furos distando da superfície 0.2 mm e 0.5 mm. E frequências de modulação variáveis, os resultados destes testes são apresentados a seguir como imagens obtidas.

Fig. 6.3 - Furos paralelos de 0.75 e 0.5 mm placa de
alumínio.

Dimensões da amostra - 3.5 x 3.5 mm

Dimensões do campo da imagem - 3.0 x 2.8 mm

Distância do furo a parede superior.

Furo 1 - 0.3mm

Furo 2 - 0.3mm

Parâmetros da imagem:

Frequência de modulação do feixe de laser - 20Hz

Potência do laser - 2,5 w

Amplificação - 100uV

Ângulo de fase no "lock-in" - 95 graus

Fig. 6.4 - Furos paralelos de 0.75 e 0.5 mm em placa de alumínio.

Dimensões da amostra - 3.5 x 3.5 mm

Dimensões do campo da imagem - 3.0 x 2.8 mm

Distância do furo a parede superior.

Furo 1 - 0.3mm

Furo 2 - 0.3mm

Parâmetros da imagem:

Frequência de modulação do feixe de laser - 25 Hz

Potência do laser - 2.5 w

Amplificação - 100uV

Ângulo de fase no "lock-in" - 95 graus

Fig. 6.5 - Furos paralelos de 0.75 e 0.5 mm em placa de alumínio.

Parâmetros da imagem:

Frequência de modulação do feixe de laser - 30 Hz

Potência do laser - 2.5 w

Amplificação - 100uV

Ângulo de fase no "lock-in" - 95 graus

Dimensões da amostra - 3.5 x 3.5 mm

Dimensões do campo da imagem - 3.0 x 2.8 mm

Distância do furo a parede superior.

Furo 1 - 0.3mm

Furo 2 - 0.3mm

Fig. 6.6 - Furos de 0.5 mm ,em cruz em amostra de latão.

Dimensões da amostra - 6.0 mm diâmetro

Dimensões do campo da imagem - 3.0 x 2.8 mm

Distância do furo a parede superior.

Furo 1 - 0.3mm

Furo 2 - 0.3mm

Parâmetros da imagem:

Frequência de modulação do feixe de laser - 20 Hz

Potência do laser - 2.5 w

Amplificação - 100uV

Ângulo de fase no "Lock-in" - 90 graus

Fig. 6.7 - Ilha de cobre (1.5mm) incrustada em um disco de alumínio.

Dimensões da amostra - 6.0 mm diâmetro

Dimensões do campo da imagem - 4.0 x 3.0 mm

Parâmetros da imagem:

Frequência de modulação do feixe de laser - 30 Hz

Potência do laser - 2.5 W

Amplificação - 25uV

Finalizando, foi realizado um teste de imagem com um circuito integrado. Verificamos que pode se ver os contornos da máscara do componente, porém não foi possível conseguir uma definição perfeita pois o sistema de deflexão não permite uma boa resolução da posição do feixe de laser sobre a superfície. Este resultado pode ser comparado a uma fotografia do circuito obtida em um microscópio ótico no qual se aumentou de 20 vezes o tamanho real da amostra.

Foto 6.8 - Fotografia ao microscópio ótico de um circuito integrado com aumento de 20 Vezes.

Fig. 6.9 - Circuito integrado correspondente a foto 6.8.

Dimensões da amostra - 2.5 X 2.5 mm

Dimensões do campo da imagem - 1.5 x 1.0 mm

Parâmetros da imagem:

Frequência de modulação do feixe de laser - 25 Hz

Potência do laser - 0.5 W

Amplificação - 25uV

Ângulo de fase no "lock-in" - 90 graus

Fig. 6.10 - Circuito integrado correspondente a foto 6.8.

Dimensões da amostra - 2.5 X 2.5 mm

Dimensões do campo da imagem - 1.5 x 1.0 mm

Parâmetros da imagem:

Frequência de modulação do feixe de laser - 30 Hz

Potência do laser - 0.5 W

Amplificação - 25uV

Ângulo de fase no "lock-in" - 90 graus

CAPÍTULO - VII

CONCLUSÕES

Podemos concluir com o desenvolvimento deste protótipo de microscópio fotoacústico, que com um aperfeiçoamento na parte de deflexão, este poderá se tornar um instrumento bastante útil para análise de materiais.

Entre as partes deste protótipo que devem ser melhoradas estão o defletor e o modulador (chopper).

A adaptação de um sistema de deflexão do feixe de laser mais sofisticado ao sistema fotoacústico não será em nenhum ponto complicado, pois a interface foi desenvolvida prevendo-se esta possibilidade. De modo que o mesmo acionador de corrente usado atualmente servirá para um defletor profissional. Além disto a unidade de interfaceamento possui mais sete entradas analógicas digitais que não estão sendo usadas. Estas entradas podem ser usadas para fazer um controle realimentado do defletor.

O sistema de modulação da luz, atualmente é feito por um modulador mecânico. Este poderia ser substituído por um modulador eletro-ótico, acionado pelo próprio computador. Esta implementação nos permitiria por exemplo fazer automaticamente imagens em profundidade. Isto se torna possível uma vez que a análise em profundidade é uma função da frequência com que o laser é modulado.

Esta implementação evitaria também a necessidade de utilização de um osciloscópio ou um frequencímetro para determinarmos qual a frequência de modulação. Além disto seria necessário fornecermos inicialmente ao computador, somente a frequência em que desejamos fazer o experimento. Este procedimento nos permitiria além de um aumento na resolução espacial devido a uma maior focalização, a possibilidade de gerarmos a imagem em velocidades mais alta.

Com respeito aos programas, as modificações e implementações podem ser realizadas de acordo com as necessidades desejadas. Uma modificação imediata destes programas, poderia ser para a geração de uma imagem colorida. Isto pode ser feito através da substituição dos procedimentos, no programa gerador, destinados a gerar níveis de cinza por geradores de cor.

Quanto ao item tratamento da imagem, podem ser implementados programas destinados a fazer uma filtragem digital da imagem. O que permitiria minimizar flutuações devidas ao ruído no sistema. Além deste podemos ter programas destinados a fazer o aumento da imagem por interpolação de pontos (Zoom).

Apesar de todos os problemas decorrentes de uma implementação preliminar de tal tipo de equipamento, acreditamos que foi possível a obtenção de resultados satisfatórios, condizentes com um prototipo que necessita de um aperfeiçoamento futuro para se tornar uma ferramenta de laboratório.

- BIBLIOGRAFIA -

- [1] - Rosencwaig, A.; "Applications of thermal-wave physics to semiconductor material", Journal de Physique, pg. C6-437, octobre 1983.
- [2] - Baumann, J., Tilgner, R.; "Photothermal examination of buried layers", Canadian J. of Physics vol 64, pg 1292, 1984.
- [3] - Thomas, R. L., Favro, L. D., Kuo, P. K.; "Thermal-wave imaging for nondestructive evaluation", Canadian J. of Physics, 64, pg 1234, 1984.
- [4] - Rosencwaig, A.; "Thermal wave microscopy with photoacoustics", J. of appl Phys. 51(4), pg 2210. 1985.
- [5] - Abate J. A., R. Roides; "Spatially resolved absorption and detection of microscopy impurities in optical thin films by photothermal detection", J. de Physique colloque C6, suppl'ement au no. 10, tome 44, pg. C6-497, octobre 1983.
- [6] - Netzelmann U., J. Pelzl; "Nondestructive evaluation of magnetic materials by ferromagnetic-resonance photothermal-deflection spectroscopy", Canadian J. of Physics vol. 64, pg 1150, 1986.
- [7] - Andrew C. Tam; "Application of photoacoustical sensing techniques"; Reviews of modern phys, vol. 58. no. 2, April 1986.
- [8] - Poulet P., R. Unterreiner, J. Chambron; "Spectroscopy photoacoustique des liquides et des solides", Journal de Biophysique et Medicine Nucleaire, 4.2 pg 83, 1980.
- [9] - Reynolds W. N., "Thermographic methods applied to industrial materials", Canadian J. of Physics vol. 64, 1986.
- [10] - George Y. Baaklini, Don J. Roth; "Probability of detection of internal voids in structural ceramics using microfocus radiography", J. Material Reserarch 1(3), pg 457, May/Jun 1986.
- [11] - Buse G., Allan Rosencwaig, "Subsurface imaging with photoacoustics", Applied Physics Letter 36(10), 15 pg 815, May 1980.

- [12] - Buse G., B. Rief, P. Eyfrer; "Photothermal nondestructive evaluation of welding seams", Canadian Journal of Physics 64. 1195 (1986).
- [13] - Richard M. Miller, Graeme R. Surtees. Christopher T. Tye, Ian P. Vickery; "The study of time dependent phenomena in materials by impulse-response photoacoustic spectroscopy", Can. J. of Phys. 64. 1146 1986.
- [14] - Busse, G., Zentrale Wiss; "Optoacoustic and photothermal imaging and microscopy", Einrichtung Physik, Hochschule der Bundeswehr Munchen, D-8014 Neubiberg, Germany F.R..
- [15] - Rosencwaig A., G. Buse; "High-resolution thermal-wave microscopy", Appl. Phys. Lett. 36(9), 1 May pg 725, 1980.
- [16] - Cavalcheiro R. F.R., C. E. Hennies, H. Vargas; "Construction , automation and performace of photoacoustic spectrometer for the study of solids", Revista Brasileira de Fisic Aplicada e Instrumentação, vol.2 No. 1,pg 13, 1987.
- [17] - Zhang Shu-Yi , Li Chen, "Photoacoustic microscopy to detect subsurface features of integrated circuits, Canadin J. of Physics 64 1316 (1986).
- [18] - Khandelwal P. K., P. W. Heiltman; "Surface flaw in strutural ceramics by scanning photoacoustic spectroscopy", Appl. Phys. Lett. 37(9). 1 November 1980.
- [19] - Rosencwaig A., A. Gersho, J. Appl. Phys. 47, 64, 1976.
- [20] - Gutfeld and Melcher; Appl. Phys. Lett. 38(2), 1 May, 1981.
- [21] - Agramonte F.; "Acoustic microscope finds tiny flaws in little ICs", research & development, june pg 32, 1985.
- [22] - Coufal H., U. Moller, S. Schneider; " Photoacoustic imaging using the Hadamard transform", Applied optics vol. 21, no. 1/1 january 1982. pg 116.
- [23] - Harwit Martin, Neil J. A. Sloane; "Hadamard Transform optics", Academic press 1979.
- [24] - Rayleigh (Lord), Nature 23, 274, 1881. *
- [25] - Mercadire M. E., Phil. Mag. 11, 78, 1881. *

- [26] - Tyndall J., Proc. Roy. Soc. 31, 307, 1881. *
- [27] - Preece W. H., Proc. Roy. Soc. 31, 506, 1881. *
- [28] - Roentgen W. C., Ann. Phys. u. Chem. 12, 155, 1881. *
- [29] - Luft K. F., Z. Techn. Phys. 24, 97, 1943. *
- [30] - Rosencwaig, A. & Gersho, A.; J. Appl Phys - 47(1), pg 64-69, 1976.
- [31] - Parker, J. G.; Appl. Opt. 12, 2974-2977, 1973.
- [32] - Ramodt, L. C., Murphy J. C. and Parker J. G.; J. Appl. Phys. 48, 927 (1977).
- [33] - Mac Donald, F.A. and Watsel, G.C.; J. Appl Phys. 49, 2313 (1978).
- [34] - Paula, Mauro Henrique ; "Determinacao de traços de metais por espectroscopia de deflexão fototérmica", Tese de doutoramento.
- [35] - Carvalho, Aparecido Augusto; "Dosimetria fotoacústica e piroeletrica de radiação na faixa de diagnostico", Tese de doutoramento.
- [36] - Nordhaus O., J. Pelzl; "Frequency dependence of resonant photoacoustic cells: The extended Helmholtz resonator", Appl. Phys. 25, 221-229, 1981.
- [37] - Rosencwaig A.; "Photo-acoustic spectroscopy of solids", Rev. Sci. Instruments, Vol. 48, No. 9, pg 1133, September 1977.
- [38] - Antunes, S., R.; "Manual tecnico M. C. 5000 XT", Eltel editora de livros tecnicos Ltda.
- [39] - Norton, Peter ; "Programer's guide to the IBM PC", Microsoft Press, copyright 1985.
- [40] - Huskey, H. D., A. K. Garnino; "Copmputer Handbook", 1a edição, ed Unicamp. Campinas, 1986.
- [41] - Ciarcia, Steve; "Construa Seu Proprio Computador Usando o MP Z80", Mc Graw-Hill.
- [42] - Motorola semiconductors; " 16 Bit Microprocessors Data Manual", 1983.

* As bibliografias assinaladas são citadas por [37] e não estão disponiveis.

- [43] - Brinch Hansen, P.; " Operating Systems Principles",
Prentice Hall, Englewoods, NJ 1970.
- [44] - Motorola semicondutores; " Microprocessors data
manual", 1983.
- [45] - Libes, Sol, Mark Garetz; "Interfacing to S-100/IEEE
696 microcomputers", Osborne/ Mc Graw-Hill Berke-
ley California.
- [46] - Glen George Langdon Jr., Edison Fregni;" Projeto de
Computadores Digitais", edgard Blucher.
- [47] - National semicondutores handbook, 1984.
- [48] - Texas instruments TTL data manual, 1979.
- [49] - Intel corporation; "Periferal design handbook", Santa
Clara, USA 1981.
- [50] - Intel corporation; "Aplications manual", 1986.
- [51] - Wakerly, J. F.; "Microcomputer Architerture and
Programing", John Wiley & Sons, Toronto,
Canada, 1986.
- [52] - Peled, A., B. Liu, "Digital Signal Processing", John
Wiley and Sons 1976.
- [53] - Texas instruments transistor handbook, 1978.
- [54] - Papoulis, A.; "The Fourrier Integral And Its
Aplications", MC Graw-Hill book company 1962.
- [55] - Foley, J. D., A. Van Dam, "Fundamentals of Interactive
Computers Graphics", Addison-Wesley, New York
1979.
- [56] - Digital Equipment Corporation; " Terminals & printers
handbook", Maynard Massachussetes, 1983.
- [57] - Farrer, Becker, Faria, Campos, Matos, Santos, Maia;
"Pascal Estruturado", Guanabara dois.
- [58] - Bordland international Inc.;" Turbo Pascal Manual",
1986.
- [59] - Wirth, Niklaus; " Programção Sistemática"; editora
campus.
- [60] - Dahmke, Mark; " Microcomputer Operating Systems"; Mc
Graw Hill, New York.

[61] - Owner's handbook; "Turbo graphix toolbox Ver 1.0",
Bordland international inc, 1985.

[62] - "MCS-86 Macro Assembly Language Reference Manual";
Intel Corporation, 1979.

APÊNDICE - I

A-I.1 - Testes preliminares com o sistema fotoacústico.

Descrevemos neste apêndice algumas das medidas preliminares, que envolveram o desenvolvimento do sistema de imagem fotoacústica. Ou propriamente dito os primeiros testes realizados com a câmara fotoacústica.

Estes teste constituíram-se de uma avaliação preliminar do desempenho da câmara, no que diz respeito à geração de imagens.

Para uma simples verificação, decidimos fazer uma varredura em apenas uma direção sobre uma amostra conhecida e a coleta de dados. Como amostra tomamos um pedaço de papel branco, cuja absorção ótica é bastante baixa e imprimimos uma letra (E), em carbono. Este material absorve totalmente luz do laser em contraste com a região branca.

Para fazermos o deslocamento do feixe laser foi implementado o circuito mostrado na figura A1, que consiste em um gerador de rampa digital, controlado por um oscilador. Este circuito permitiu defletir o laser sobre a superfície ao longo de uma direção.

83

Através da amplificação síncrona do sinal proveniente da câmara, aplicado a um registrador x,y, juntamente com o sinal de deflexão podemos obter um gráfico da absorção pela amostra em função da posição geométrica do feixe de laser sobre a amostra.

Este resultado é apresentado no gráfico da fig A.2, no qual podemos ver claramente a diferença de absorção ótica na região do papel de fundo e na região negra correspondente à letra E. Para este teste foram usadas uma modulação da luz Laser de 20 Hz, e uma focalização da ordem de 50um.

Fig. A.2 - Sinal da câmara foto-fotoacústica versus deflexão.

Nas regiões negras para este material obtemos uma absorção que corresponde a uma diferença de 25mV, em relação as regiões claras do papel.

A-I.2 - Teste de linearidade do defletor de feixe de laser.

O defletor de feixe de laser em nosso sistema sem dúvida é um componente crítico, pois em função dele estão a resolução do sistema e a linearidade da imagem. Porém como este sistema de deflexão servirá apenas para uma implementação preliminar, determinamos qual é sua curva de deflexão.

Esta curva da o comportamento do feixe de laser em deflexão angular, em função da tensão aplicada nas bobinas do defletor pelos circuito de conversão digital analógica.

A curva de deflexão foi obtida através de um método trigonométrico, onde se verifica a abertura angular do feixe em função de uma distância fixada (250mm), entre o defletor e um anteparo, de acordo com a tensão aplicada em suas bobinas.

Na fig. A.3 podemos ver o gráfico comparativo entre deflexão na direção x, e direção y, na qual vemos que o defletor não é, como esperado, linear para tensões altas. Pois neste regime o numero de linhas de campo que corta o solenoide é menor do que no inicio do curso.

Desta forma o defletor presente só pode ser usado com alguma precisão para pequenos angulos, de até no maximo 2.0 graus.

Fig. A.3 - Curva de deflexão
para X e Y.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP/IFQSC DFCM	
Laboratório de Instrumentação Eletrônica - LIE	
SISTEMA DE IMAGEM FOTO ACÚSTICA	F1/1
Proj: Jose Carlos Rossi	
Des: Maria B. Souza	São Carlos, 28 de Out. de 87

APÊNDICE - II

A-II.1 - Diagrama eletrônico da interface desenvolvida para o SIFA.

Apresentamos neste apêndice o diagrama lógico eletrônico da unidade de interfaceamento desenvolvida para o protótipo de microscópio fotoacústico, que pode ser visto na fig. AII.1. Os detalhes de funcionamento desta interface são apresentados no capítulo IV.

AII.2 - Desenvolvimento da arte final para a interface.

Como esta é uma interface de uso genérico no controle de experimento e aquisição de dados, foi desenvolvido um lay-out da interface. Neste projeto foram incluídas saídas digitais bufferizadas e um conversor analógico digital de 12bits (AD547), que pode trabalhar em paralelo com o de 8 bits, já existente no primeiro protótipo. Nas fig. AII.2 podemos ver o projeto de circuito impresso desenvolvido.

APÊNDICE - III

A-III - Listagens dos programas PRINCIPAL, e GERADOR.

Apresentamos neste apêndice as listagens dos programas PRINCIPAL e GERADOR, programas estes que foram desenvolvidos em linguagem PASCAL, e se destinam ao controle e geração de imagens respectivamente, no protótipo de microscópio de absorção ótica.

Este programa foi designado pelo nome de SIFA (sistema de imagem fotoacústica), na forma compilado.

```

(* * * * * *)
(*                                     *)
(*  PROGRAMA DE GERACAO DE IMAGEM FOTOACUSTICA  *)
(*                                     *)
(*  - Desenvolvido na universidade de Sao Paulo - *)
(*                                     *)
(*          [ Jose Carlos Rossi  01/08/87 ]      *)
(*                                     *)
(* * * * * * *)

```

PROGRAM SIFA;

{ Inclusao de subrotinas de controle grafico }

```

{ $i typedef.sys }
{ $i graphix.sys }
{ $i kernel.sys }
{ $i windows.sys }

```

const

{ palavra de controle da * 8255 * }

```

WU1=$80;      {condicao PAs,PBs,PCs}
WU2=$82;      {condicao PAs,PBs,PCe}
RU1=$90;      {condicao PAe,PBs,PCs}
RU2=$92;      {condicao PAe,PBs,PCe}

```

{ constantes de acionamento de RD & WR }

```

LEIT=$f8;
ESCR=$60;
DESLI=$00;

```

{ constantes de programacao da porta U1 }

```

CU1=$503;
PAU1=$500;
PBU1=$501;
PCU1=$502;

```

{ constantes de programacao da porta U2 }


```
CU2=$513;
PAU2=$510;
PBU2=$511;
PCU2=$512;
```

```
{ constantes de controle do conversor ADC 0808 }
```

```
LE7=$F7;      { xxx1 0111 }
LE6=$F6;      { xxx1 0110 }
LE5=$F5;      { xxx1 0101 }
LE4=$F4;      { xxx1 0100 }
LE3=$F3;      { xxx1 0011 }
LE2=$F2;      { xxx1 0010 }
LE1=$F1;      { xxx1 0001 }
LE0=$F8;      { xxx1 1000 }
```

```
var
```

```
nome,fonte,destino:           string [12];
texto1,texto2:                text;
BO,TESTE,QUIT,ACABOU,FIM:     boolean;
OP,CH,b1:                     char;
Sinacustico:                   array[1..200,1..80] of byte;
A1,A2,A3,ENDER,DADO,
S1,S2,S3,S4,S5,M,EOC,
X1,X2,POSIX,POSIY,DIGT:       byte;
I,J,NC,NUM,tempo,
frequencia,X,Y:               integer;
```

```
procedure som;
```

```
begin
  sound(440);
  delay(500);
  sound(800);
  delay(500);
  sound(660);
  delay(500);
  sound(520);
  delay(500);
```

```
procedure abertura;
```

```
clrscr;
```

[illegible]

SISTEMA DE IMAGEM FOTO-ACUSTICA

* copyright 1988 ver 1.0 *

- Pressione qualquer tecla para continuar -

end;

begin

class;

[illegible]

- MENU PRINCIPAL -

Docoes:

```
writeln'*';
writeln'*';
writeln'*';
writeln'*';
writeln'*';
writeln'*';
writeln'*';
writeln'*';
writeln'*';
writeln'*';
writeln'*';
writeln'*';
writeln'*';
writeln'*';
writeln'*';
```

A - Aquisicao de imagem.

B - Introducao de parametros da imagem.

C - Testes no sistema foto-acustico.

D - Tratamento da imagem.

E - Sai para o sistema.

- Selecione a opcao teclando uma letra - (

```
* * * *w*ite*n*';* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
```

```
gotoxy(57,21);
```

```
end;
```

```
procedure MENUdois;
```

```
procedure Adois;
```

```
procedure muda;
```

```
begin
```

```
begin
```

```
clrscr;
```

```
gotoxy(20,12);
```

```
write('conversor ( 1 ou 2 ) = ');
```

```
readln(b1);
```

```
clrscr;
```

```
end;
```

```
gotoxy(20,12);
```

```
write(' Dado a ser enviado = ');
```

```
readln(A3);
```

```
DADO:=A3;
```

```
clrscr;
```

```
gotoxy(22,12);
```

```
writeln(' * * * Valores Lidos * * *');
```

```
gotoxy(20,20);
```

```
writeln('Aperte qualquer tecla para continuar');
```

```
read(KBD,CH);
```

```
clrscr;
```

```
end;
```

```
procedure iniciaw;
```

```
begin
```

```

port[cu1]:=wu1;
port[cu2]:=wu2;
end;

procedure dadow;
begin
    if b1='1' then port[pau1]:=dado;
    if b1='2' then port[pbu1]:=dado;

end;

procedure writex;
begin
    port[pau1]:=dado;
end;

procedure writey;
begin
    port[pbu1]:=dado;
end;

procedure rodaw;

{ Ao entrarmos neste procedimento devemos }
{ ter os seguintes valores nas variaveis }
{ CORDENADA - deve conter um dos valores }
{ DADO - deve conter o valor da dado a ser transmitido $00-$FF }

begin
    dadow;
    { writex; }
    { writey; }

    clrscr;

```

```

end;

{ programa principal do procedure Aadois }

begin
    iniciaw;
    clrscr;
    repeat
        gotoxy(20,2);
        writeln(' * * * MENU DE ESCRITA * * * ');
        gotoxy(20,12);
        writeln('M - Mudar os valores');
        gotoxy(20,14);
        writeln('E - Executar a escrita');
        gotoxy(20,16);
        writeln('V - Voltar ao menu de teste do sistema');
        read(KBD,CH);
        FIM:=false;
        case ch of
            'E','e':rodaw;
            'V','v':fim:=true;
            'M','m':muda;
            'A','a':;
        end;
    until fim;
    fim:=false;
    MENUadois;
end;

procedure Badois;

procedure iniciaw;

begin
    port[cu2]:=ru1;      { Inicializa o porto }
    port[pbu2]:=$00;
end;

procedure leitura;

begin
    delay(500);
    Dado:=port[pau2];
    port[pbu2]:=le0;
end;

procedure dador;

```

```

begin
    port[pbu2]:=desli;      { Le a entrada desejada do A/D }
end;

procedure rodar;

begin
    clrscr;
    leitura;
    dador;
    gotoxy(20,16);
    write('Valor do dado lido no conversor A/D - ',dado);
    read(KBD,ch);
    clrscr;
end;

procedure aquisicao;

begin
    fim:=false;
    clrscr;
    gotoxy(20,10);
    writeln('Fazendo a aquisicao continua de dados');
    gotoxy(20,16);
    write('Valor do dado lido no conversor A/D - ');

    repeat

        leitura;
        dador;
        write(' ',dado);

    until keypressed;

    fim:=false;
    clrscr;
    end;

{ programa principal do procedure Bdois }

begin
    iniciier;
    clrscr;
    repeat
        gotoxy(20,2);
        writeln('* * * MENU DE LEITURA * * *');
        gotoxy(20,12);
        writeln('E - Executar a leitura');
        gotoxy(20,14);
        writeln('A - Faz a aquisicao continua de dados');
    
```

```

        gotoxy(20,16);
        writeln('V - Voltar ao menu de teste do sistema');
        read(KBD,CH);
        FIM:=false;
        case ch of
            'E','e':rodar;
            'V','v':fim:=true;
            'A','a':aquisicao;
        end;
until fim;
    fim:=false;
    MENUdois;

end;

{ Comeco do procedimento que gera uma Mira (quadrado) }

procedure MIRA;
begin
    port[cu1]:=wu1;    {iniciaw}
    clrscr;
    gotoxy(20,2);
    writeln('* * * GERADOR DE MIRA * * *');
    gotoxy(16,14);
    writeln(' O raio Laser devera estar gerando um quadro');
    gotoxy(20,22);
    writeln(' Aperte qualquer tecla para parar');

    posix:=$00;
    posiy:=$00;

    port[pau1]:=posix;
    port[pbu1]:=posiy;

    repeat
        for posix:=$00 to $ff do
            begin
                port[pau1]:=posix;
            end;

            for posiy:=$00 to $ff do
                begin
                    port[pbu1]:=posiy;
                end;

            while posix>$00 do

```

```

begin
port[pau1]:=posix;
posix:=posix-$01;
end;

while posiy>$00 do

begin
port[pbu1]:=posiy;
posiy:=posiy-$01;
end;

until keypressed;

clrscr;
MENUdois;
end;

{ Programa principal do Menudois }

begin

clrscr;
gotoxy(20,2);
writeln(' * MENU PRINCIPAL *');
gotoxy(20,12);
writeln('E - Escrever um numero no D/A');
gotoxy(20,14);
writeln('L - Ler um numero no A/D');
gotoxy(20,16);
writeln('G - Gera uma mira com o Laser');
gotoxy(20,18);
writeln('V - Voltar para o menu principal');
gotoxy (20,22);
writeln(' Aperte a tecla da opcao desejada');
write(#7);
repeat;
read(kbd,b1);
bo:=false;
case b1 of
'E','e':Adois;
'L','l':Bdois;
'G','g':mira;
'V','v':bo:=true;
end;
until bo;
bo:=false;
end;

```



```

{ * * * * * }
{ * * * * * }
{ * Sistema de Imagem Foto-acustica * }
{ * * * * * }
{ * Programa gerador * }
{ * * * * * }
{ * [ Jose Carlos Rossi 9/10/1987 ] * }
{ * * * * * }
{ * * * * * }

```

```

procedure gerador;

```

```

procedure header1;

```

```

begin

```

```

    InitGraphic;
    defineheader(1,'SISTEMA DE IMAGEM FOTOACUSTICA * Rossi-88 *');
    setheaderon;
    DrawBorder;

```

```

end;

```

```

procedure header2;

```

```

begin

```

```

    setheaderoff;
    defineheader(1,'SISTEMA DE IMAGEM FOTOACUSTICA AQUISIÇÃO ');
    setheaderon;

```

```

end;

```

```

procedure escrnome;

```

```

begin

```

```

    goxy(5,5);
    write( nome );

```

```

end;

```

```

procedure salva;

```

```

begin

```

```

    savescreen(destino);
    LeaveGraphic;

```

end;

procedure n0;

begin

{	}
{	}
{	}
{	}

end;

procedure n1;

begin

DP(x+3,y+1);

end;

procedure n2;

begin

DP(x+1,y+1);

DP(x+3,y+2);

end;

procedure n3;

begin

DP(x+1,y+1);DP(x+3,y+1);

DP(x+2,y+2);

```

end;

procedure n4;

begin

DP(x+1,y+1);DP(x+3,y+1);
DP(x+1,y+2);DP(x+3,y+2);

end;

procedure n5;

begin

DP(x+1,y+0);DP(x+3,y+0);
DP(x+2,y+2);
DP(x+1,y+3);DP(x+3,y+3);

end;

procedure n6;

begin

DP(x+0,y+0);DP(x+4,y+0);
DP(x+3,y+1);
DP(x+1,y+2);
DP(x+0,y+3);DP(x+4,y+3);

end;

procedure n7;

begin

DP(x+0,y+0);DP(x+4,y+0);
DP(x+3,y+1);
DP(x+1,y+2);DP(x+2,y+2);
DP(x+0,y+3);DP(x+4,y+3);

end;

procedure n8;

begin

```

```
DP(x+0,y+0);DP(x+2,y+0);DP(x+4,y+0);
DP(x+1,y+1);
DP(x+3,y+2);
DP(x+0,y+3);DP(x+2,y+3);DP(x+4,y+3);
```

```
end;
```

```
procedure n9;
```

```
begin
```

```
DP(x+2,y+0);
DP(x+1,y+1);DP(x+2,y+1);DP(x+3,y+1);
DP(x+1,y+2);DP(x+2,y+2);DP(x+3,y+2);
DP(x+2,y+3);
```

```
end;
```

```
procedure n10;
```

```
begin
```

```
DP(x+0,y+0);DP(x+2,y+0);DP(x+4,y+0);
DP(x+1,y+1);DP(x+3,y+1);
DP(x+0,y+2);DP(x+2,y+2);DP(x+4,y+2);
DP(x+1,y+3);DP(x+3,y+3);
```

```
end;
```

```
procedure n11;
```

```
begin
```

```
DP(x+0,y+0);DP(x+2,y+0);DP(x+4,y+0);
DP(x+0,y+1);DP(x+1,y+1);DP(x+3,y+1);DP(x+4,y+1);
DP(x+0,y+2);DP(x+1,y+2);DP(x+3,y+2);DP(x+4,y+2);
DP(x+0,y+3);DP(x+2,y+3);DP(x+4,y+3);
```

```
end;
```

```
procedure n12;
```

```
begin
```

```
DP(x+1,y+0);DP(x+3,y+0);  
DP(x+0,y+1);DP(x+1,y+1);DP(x+2,y+1);DP(x+3,y+1);DP(x+4,y+1);  
DP(x+0,y+2);DP(x+1,y+2);DP(x+2,y+2);DP(x+3,y+2);DP(x+4,y+2);  
DP(x+1,y+3);DP(x+3,y+3);
```

```
end;
```

```
procedure n13;
```

```
begin
```

```
DP(x+1,y+0);DP(x+2,y+0);DP(x+3,y+0);  
DP(x+0,y+1);DP(x+1,y+1);DP(x+2,y+1);DP(x+3,y+1);DP(x+4,y+1);  
DP(x+0,y+2);DP(x+1,y+2);DP(x+2,y+2);DP(x+3,y+2);DP(x+4,y+2);  
DP(x+1,y+3);DP(x+2,y+3);DP(x+3,y+3);
```

```
end;
```

```
procedure n14;
```

```
begin
```

```
DP(x+0,y+0);DP(x+1,y+0);DP(x+2,y+0);DP(x+3,y+0);  
DP(x+0,y+1);DP(x+1,y+1);DP(x+2,y+1);DP(x+3,y+1);DP(x+4,y+1);  
DP(x+0,y+2);DP(x+1,y+2);DP(x+2,y+2);DP(x+3,y+2);DP(x+4,y+2);  
DP(x+1,y+3);DP(x+2,y+3);DP(x+3,y+3);DP(x+4,y+3);
```

```
end;
```

```
procedure n15;
```

```
begin
```

```
DP(x+0,y+0);DP(x+1,y+0);DP(x+2,y+0);DP(x+3,y+0);DP(x+4,y+0);  
DP(x+0,y+1);DP(x+1,y+1);DP(x+2,y+1);DP(x+3,y+1);DP(x+4,y+1);
```

```
DP(x+0,y+2);DP(x+1,y+2);DP(x+2,y+2);DP(x+3,y+2);DP(x+4,y+2);
DP(x+0,y+3);DP(x+1,y+3);DP(x+2,y+3);DP(x+3,y+3);DP(x+4,y+3);
```

```
end;
```

```
procedure testesinal;          { Seleciona o padrao de video }
```

```
begin
```

```
    NC:=SINACUSTICO[I,J];
```

```
    if (nc)=$00) and (nc<$0F) then n0;
    if (nc)=$0F) and (nc<$1F) then n1;
    if (nc)=$1F) and (nc<$2F) then n2;
    if (nc)=$2F) and (nc<$3F) then n3;
    if (nc)=$3F) and (nc<$4F) then n4;
    if (nc)=$4F) and (nc<$5F) then n5;
    if (nc)=$5F) and (nc<$6F) then n6;
    if (nc)=$6F) and (nc<$7F) then n7;
    if (nc)=$7F) and (nc<$8F) then n8;
    if (nc)=$8F) and (nc<$9F) then n9;
    if (nc)=$9F) and (nc<$AF) then n10;
    if (nc)=$AF) and (nc<$BF) then n11;
    if (nc)=$BF) and (nc<$CF) then n12;
    if (nc)=$CF) and (nc<$DF) then n13;
    if (nc)=$DF) and (nc<$EF) then n14;
    if (nc)=$EF) and (nc<$FF) then n15;
```

```
end;
```

```
procedure plota;
```

```
begin
```

```
    testesinal;
```

```
end;
```

```
procedure EOC; {Testa o fim da conversao A/D}
```

```
begin
```

```
    inline($50/$51/$b1/$7/$A0/DADO/$D2/$E8/$A2/DADO/$59/$58);
```

```
end;
```

```
procedure lesinal;
```

begin

```
delay(800 div frecuencia);
port[pbu2]:=le0;
eoc;
port[pbu2]:=desli;
delay(800 div frecuencia);
```

```
S1:=port[pau2];
port[pbu2]:=le0;
eoc;
port[pbu2]:=desli;
delay(800 div frecuencia);
S2:=port[pau2];
```

```
port[pbu2]:=le0;
eoc;
port[pbu2]:=desli;
delay(800 div frecuencia);
S3:=port[pau2];
```

```
port[pbu2]:=le0;
eoc;
port[pbu2]:=desli;
delay(800 div frecuencia);
S4:=port[pau2];
```

```
port[pbu2]:=le0;
eoc;
port[pbu2]:=desli;
delay(800 div frecuencia);
S5:=port[pau2];
```

```
M:=(S1+S2+S3+S4+S5) DIV 5;      ( Faz a media local )
```

```
SINACUSTICO[I,J]:=m;           ( Matriz recebe o valor )
```

end;

procedure message;

begin

```
x:=700;
y:=200;
setheaderoff;
defineheader(1, ' SISTEMA FOTO-ACUSTICO DESATIVADO ');
setheaderon;
gotoxy(20,20);
writeln(' Voltando ao menu principal ');
delay(100);
```

end;

procedure posiciona;

begin

```
defineworld(1,0,0,639,200);  
selectworld(1);  
selectwindow(1);
```

```
port[cu2]:=ru1; { Inicializa o porto }
```

```
POSIY:=$00;  
POSIY:=$00;  
EOC:=$ff;  
I:=0;  
J:=0;  
y:=10;
```

```
port[cu1]:=wu1;  
port[cu2]:=ru1;  
while y<=200 do
```

```
begin
```

```
    x:=0;  
    port[pbu1]:=posiy;  
    posix:=$00;  
    delay(100);
```

```
begin
```

```
    while x<=639 do
```

```
begin
```

```
    port[pau1]:=posix;  
    I:=j+1;  
    lesinal;  
    plota;  
    x:=x+5;  
    posix:=posix+$02;  
    if keypressed then message;
```

```
end;
```

```
Y:=y+4;
```

```
J:=j+1;  
posiy:=posiy+$05;
```

```
end;
```

```
end;
```

```
end;
```

```
procedure aquisition;
```



```

begin
    begin
        posiciona;
    end;
end;

{ Programa principal de geracao de imagem }

begin
    header1;
    aquisicao;
    header2;
    escrnome;
    salva;

    som;
    clrscr;

end;

{ Fim do gerador }

{ A partir daqui os procedimentos fundamentais do programa }

procedure A;
{ este procedimento faz geracao da imagem }
begin
    clrscr;
    gerador;
end;

procedure B;
{ este procedimento gera um arquivo e salva a tela }
begin
    clrscr;
    INITGRAPHIC;
    defineheader(1,'INTRODUCAO DE PARAMETROS DA IMAGEM');
    SETHEADERON;
    drawborder;
    gotoxy(20,12);
    writeln('Forneca o nome da imagem a ser gravada no disco');
    gotoxy(20,14);
    write('Nome do arquivo = ');

```

```

        readln(destino);
        gotoxy(20,16);
        write('Nome da imagem = ');
        readln(nome);
        setbackground(0);
        drawborder;
        gotoxy(20,12);
        write('Forneca a frequencia de chopper do feixe de LASER');
        gotoxy(20,16);
        write('Frequencia do chopper em Hertz = ');
        readln(frequencia);
        leavegraphic;
        write(#7);
    end;

    procedure C;

    begin
        clrscr;
        menudois;
        write(#7);

    end;

    procedure D;

    procedure recarregar;

    begin
        clrscr;
        initgraphic;
        defineheader(1,' SISTEMA DE IMAGEM FOTO-ACUSTICA (ROSSI 87)');
        SETHEADERON;
        drawborder;
        gotoxy(20,12);
        writeln('Voce podera recarregar uma imagem do disco ');
        gotoxy(20,16);
        write('Nome do arquivo fonte = ');
        readln(fonte);

        loadscreen(fonte);

        read(KBD,CH);
        leavegraphic;
        clrscr;
        write(#7);
        end;

    procedure imprimir;

    begin
        clrscr;
        initgraphic;

```

```

defineheader(1,' SISTEMA DE IMAGEM FOTO-ACUSTICA  (ROSSI 87)');
setheaderon;
drawborder;
gotoxy(16,12);
);
writeln('Voce podera recarregar uma imagem do disco para imprimir'
gotoxy(20,16);
write('Nome do arquivo fonte = ');
readln(fonte);
setbackground(0);
drawborder;
gotoxy(20,16);
writeln('Impressora "OK" aperte qualquer tecla ');
read(KBD,ch);

        loadscreen(fonte);

        hardcopy(false,1);

leavegraphic;

clrscr;
write(#7);

end;

procedure menud;
begin
    clrscr;
    gotoxy(20,12);
    writeln('R - Recarregar uma imagem');
    gotoxy(20,14);
    writeln('P - Imprimir uma imagem');
    gotoxy(20,16);
    writeln('V - Voltar ao menu de teste do sistema');
    gotoxy(20,20);
    writeln('Aperte a tecla da opcao desejada');
    write(#7);
end;

( Programa principal do procedimento D )

begin
    menud;

repeat

    read(kbd,ch);
    quit:=false;
    case ch of
        'R','r':reacarregar;
        'P','p':imprimir;
        'V','v':quit:=true;

```

```

        end;
        menud;
until quit;
quit:=false;
clrscr;
end;

```

```

{ programa principal geral }

```

```

begin

```

```

    ABERTURA;
    som;
    READ(KBD,CH);
    clrscr;

```

```

repeat
    quit:=false;
    menu;
    readln (OP);
    case op of
        'A','a':begin som; A; end;
        'B','b':B;
        'C','c':C;
        'D','d':D;
        'E','e':QUIT:=TRUE;
    end;
until QUIT;

```

```

    clrscr;

```

```

    initgraphic;           { Abre modo grafico }
    drawborder;
    gotoxy(20,12);
    writeln(' * Bye Bye Estou saindo para o sistema * ');
    som;
    delay(500);
    leavegraphic;          { Fecha modo grafico }
    clrscr;
end.

```