CONTRATO TELEBRÁS
143/76

GERADOR AUTOMÁTICO DE MÁSCARAS USADAS NA CONFECÇÃO DE CIRCUITOS INTEGRADOS II: "SISTEMA ÓPTICO DE PROJEÇÃO E CONTROLE DA FONTE DE LUZ"

CK.15M

27/78

Carlos Alberto dos Reis Filho
Carlos Ignácio Zamitti Mammana

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
MAIO DE 1978

codex

CONVÊNIO UNICAMP/TELEBRÁS 143/76

ATIVIDADE MP-003 - DESENVOLVIMENTO DE UM PROJETOR DE IMAGENS P/ COORDENATÓGRAFO

TÍTULO GERADOR AUTOMÁTICO DE MÁSCARAS USADAS NA CONFECÇÃO DE CIRCUITOS INTEGRADOS. II: "SISTEMA ÓPTICO DE PROJEÇÃO E CONTROLE DA FONTE DE LUZ"

AUTOR CARLOS ALBERTO DOS REIS FILHO

ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS IGNÁCIO ZAMITTI MAMMANA

DATA maio/78

RESUMO / OBSERVAÇÕES

O sistema que apresentamos nesse trabalho gera configurações sobre fotolitos pela projeção seletiva de quadrados luminosos, com resolução suficiente para a obtenção de máscaras para circuitos integrados em média e grande escala.

Um quadrado luminoso é projetado em foco sobre fotolito através de um sistema óptico ampliador que é posicionado, ao longo do plano do fotolito, por três motores de passo que são comandados a partir de um terminal de computador PDP-11.

A fonte de luz do sistema é formada por lâmpadas de descarga gasosa de Xenônio contidas em um refletor-condensador cônico, não convencional, cuja função é aumentar o rendimento luminoso na extremidade de entrada de um cabo de fibras ópticas por meio da qual se ilumina o projetor óptico.

Foram estabelecidas dimensões padrões de 1, 2, 3, 4 e 5 mm para os quadrados projetados e o desvio máximo apresentado foi de +1%.

A confiabilidade da fonte de luz foi constatada com uma sequência de 800 mil disparos em 10 Hz, não ocorrendo nenhuma falha.

Dada a sua completa automatização o sistema substitue com vantagens o "cut & peel" de rubylith.

O presente trabalho foi apresentado como tese de Mestrado à Faculdade de Engenharia de Campinas/UNICAMP e aprovado em 16-06-1978, tendo como banca examinadora:

Prof. Dr. Aruy Marotta

Prof. Dr. Carlos I. Z. Mammana

Prof. Dr. Hermano de Medeiros Ferreira Tavares

Agradeço

a todos aqueles que contribuiram para a realização deste trabalho.

Este trabalho contou com o apoio financeiro das entidades:

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
TELEBRÁS - Telecomunicações Brasileiras
UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas

INDICE

CAPÍTULO 1 - GERAÇÃO DE ARTES FINAIS

1.1 - Utilização de "Rubylith" 1.1
1.2 - Métodos Fotográficos 1.2
1.3 - Métodos mais Recentes 1.3
1.4 - O Método Adotado 1.3
1.5 - Descrição do Sistema Concebido 1.3
Referências Bibliográficas 1.7

CAPÍTULO 2 - MÓDULOS PROJETORES

2.1 - Introdução 2.1
2.2 - Considerações Iniciais 2.1
2.3 - Caracterização das Objetivas 2.2
2.3.1 - Modelo Matemático 2.2
2.3.2 - Equipamento Utilizado nas Medidas 2.7
2.3.3 - Procedimento Experimental 2.8
2.3.4 - Resultados Experimentais 2.9
2.4 - Determinação dos Objetos e Objetiva 2.17
2.5 - Construção dos Módulos 2.18
2.6 - Montagem dos Módulos 2.22
Referências Bibliográficas 2.26

CAPÍTULO 3 - FONTE DE LUZ

3.1 - Introdução	3.1
3.2 - Lâmpada Utilizada	3.2
3.3 - Determinação da Energia por Disparo	3.6
3.4 - Condensadores Cônicos	3.12
3.5 - Construção do Condensador Cônico	3.14
3.6 - Testes da Fonte de Luz	3.17
Referências Bibliográficas	3.19

CAPÍTULO 4 - SISTEMA ELÉTRICO DE CONTROLE

4.1 - Introdução	4.1
4.2 - Atuação do Sistema de Controle	4.3
Referências Bibliográficas	4.21

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS OBTIDOS

CAPÍTULO 1

Geração de Artes Finais

1.1 - Utilização de "Rubylith"

O método mais difundido para a geração de artes finais para confecção de máscaras para circuitos integrados é o chamado "cut & peel" de rubylith.

Rubylith é um material plástico constituído de uma camada de mylar revestida com um plástico vermelho.

O plástico vermelho que reveste o mylar é cortado e retirado em determinadas regiões da chapa, permitindo assim a definição de áreas transparentes incolores e vermelhas, como mostra a figura 1.1.

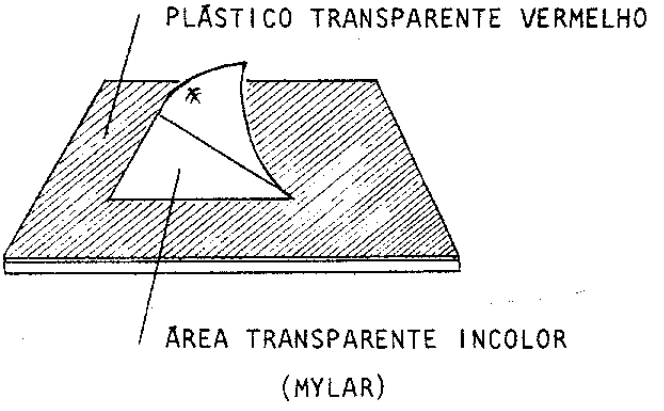


Fig. 1.1 - Corte e decapagem do rubylith.

Para o corte do plástico vermelho é usado um coordenatógrafo que

permite o posicionamento e varredura de uma faca vertical ao longo de todo o plano em que é colocado o rubylith.

Com esse sistema pode-se gerar linhas com espessura mínima de 200μm com um erro de posicionamento de $\pm$ 10μm.

A arte final gerada em rubylith deve ser reduzida fotograficamente até atingir as dimensões desejadas. Durante o processo de fotorredução é usada uma fonte de luz verde que torna opacas as regiões vermelhas.

De um modo geral todo o processo é realizado manualmente, ou seja, a faca é posicionada em um ponto de coordenadas (X_1, Y_1) e levada, com o gume abaixado, até um outro ponto de coordenadas (X_2, Y_2) onde, eventualmente será levantada e iniciar, a partir daí, um novo corte.

A retirada do plástico vermelho nas regiões desejadas (peeling) só pode ser feita manualmente e isso impede uma completa automatização do processo, tornando-o lento e não muito confiável, além de economicamente dispendioso posto que o rubylith é um material de elevado custo e de difícil aquisição no Brasil atualmente, dada a sua específica utilização.

É evidente que as falhas desse processo se acentuam proporcionalmente ao grau de complexidade da máscara a ser gerada, a ponto de tornar-se quase inviável para geração de máscaras de circuitos integrados em grande escala (L.S.I.).

1.2 - Métodos Fotográficos

Com a substituição do rubylith por filmes gráficos de alto contraste sensibilizados por um feixe de luz de diâmetro variável ou pela projeção seletiva de quadrados luminosos sucessivos, a geração de artes finais com a utilização de um coordenatógrafo pode ser totalmente automatizada. No caso das máscaras de circuitos integrados as configurações são geradas em escala 100/1 a 250/1, tal como quando se utiliza rubylith.

Normalmente as configurações geradas tanto em rubylith como em filme gráfico sofrem duas etapas de redução fotográfica para que se atinja a máscara final.

A primeira, em câmara fotorredutora, de 20 a 50X e a segunda, em uma fotorrepetidora, de 5X (estes são os padrões do L.E.D.).

Existem, ainda, geradores ópticos de configurações que dispensam a

primeira etapa de fotorredução. A arte final é gerada em escala 5/1, constituindo assim a célula a ser fotomultiplicada. Neste caso são utilizadas placas de alta resolução rígidas em lugar de filmes gráficos e o sistema mecânico deve apresentar características de precisão e repetibilidade bastante estreitas.

1.3 - Métodos mais Recentes

Com a crescente demanda de reduções além dos limites de resolução dos sistemas ópticos fotográficos foram desenvolvidos sistemas que utilizam um feixe de elétrons controlado. Tais sistemas permitem a obtenção de linhas com espessura mínima de 0,3μm e dispensam as etapas de fotorredução, ou seja, as máscaras são geradas diretamente na superfície da lâmina do semicondutor. Outros sistemas para a geração direta de máscaras que utilizam raios-X ou laser concorrem em desempenho com os que utilizam um feixe de eletrons. Esses sistemas são adequados para a integração em grande escala (L.S.I.).

1.4 - O Método Adotado

O método para geração de artes finais no L.E.D. pelo qual optamos e que descrevemos neste trabalho, baseia-se no processo óptico fotográfico, é automático e adequado para a geração de máscaras de sistemas em média escala (M.S.I.).

1.5 - Descrição do Sistema Concebido

O sistema automático concebido pode ter o seu desempenho descrito do seguinte modo:

Um programa gerador de máscaras (ref. 1) fornece uma listagem, ou fita de papel perfurada, das coordenadas iniciais e finais dos segmentos que formam a máscara.

A máscara é associada a uma matriz de pequenos quadrados preenchidos seletivamente. Na trasferência de informação da sua estrutura, cada linha da matriz é formada por segmentos brancos e escuros.

A leitura e interpretação da fita de papel é feita por um sistema

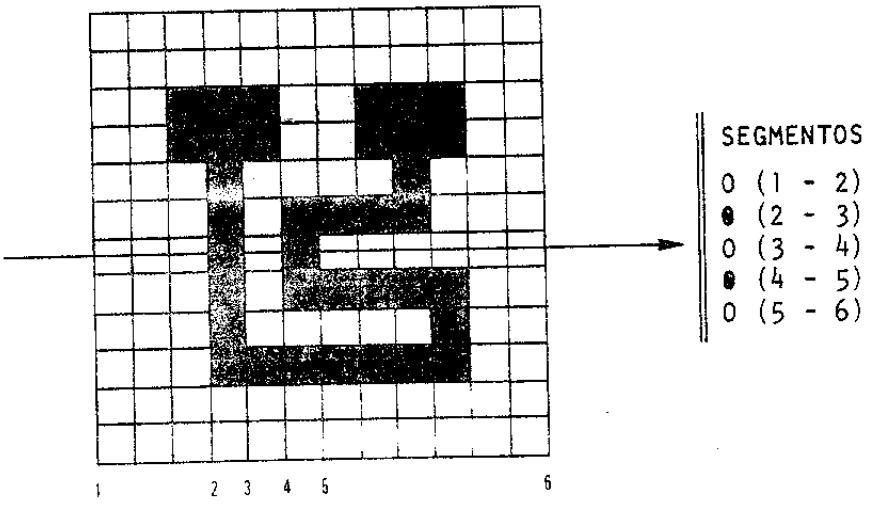


Fig. 1.2 - Qualquer configuração é associada a uma matriz de pequenos quadrados preenchidos seletivamente.

que comanda três motores de passo (ref. 2) acoplados a um sistema mecânico cuja função é efetuar o deslocamento, ao longo de todo o plano do coordenatógrafo, de um projetor de quadrados luminosos que impressiona sucessivamente um filme de fotolito colocado sobre a mesa do coordenatógrafo, reconstituindo, assim, a máscara.

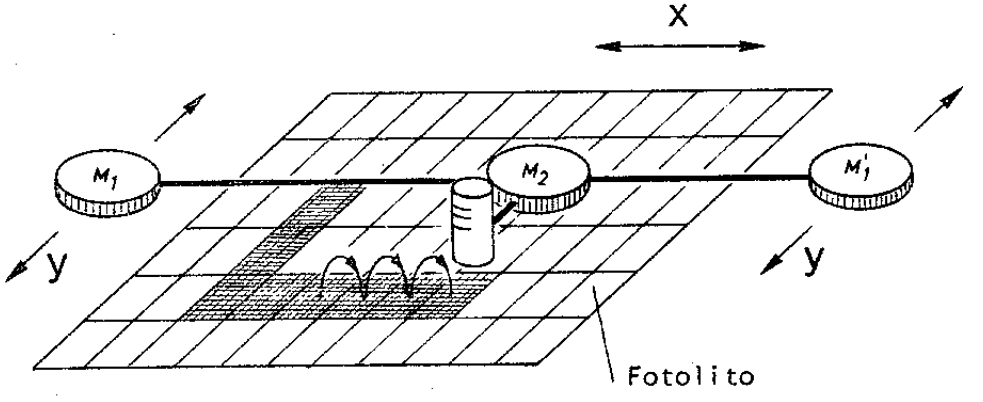


Fig. 1.3 - Três motores de passo posicionam o módulo projetor na geração de uma máscara.

Os motores M_1 e M'_1, sincronizados, deslocam o braço x na direção y

e o motor M_2, desloca o projetor na direção x, como mostra a figura 1.3.

Os motores utilizados, Phillips - PD-12 com redutores mecânicos Coradi, apresentam deslocamento linear de 10μm por passo e probabilidade de falha de um passo em definindo assim o erro de posicionamento do sistema.

A menor dimensão de quadrado projetado é 1mm de lado, que após duas etapas de reduções, num total de 200X, leva a 5μm de dimensão mínima em uma máscara.

Na atual configuração, o sistema projeta quadrados com 1, 2, 3, 4 ou 5mm de lado devido aos cinco módulos projetores cambiáveis construídos.

Com a construção de outros módulos, o sistema poderá projetar quadrados com dimensões diferentes das atualmente padronizadas, projetar caracteres e até mesmo sub-máscaras. O projeto e construção dos módulos projetores são tratados no Capítulo II.

A exposição do filme pela projeção de cada quadrado é efetuada por lâmpadas de descarga gasosa de Xenônio encerradas em um condensador óptico que se acha acoplado ao módulo projetor por meio de um cabo de fibras ópticas, como mostra a figura 1.4.

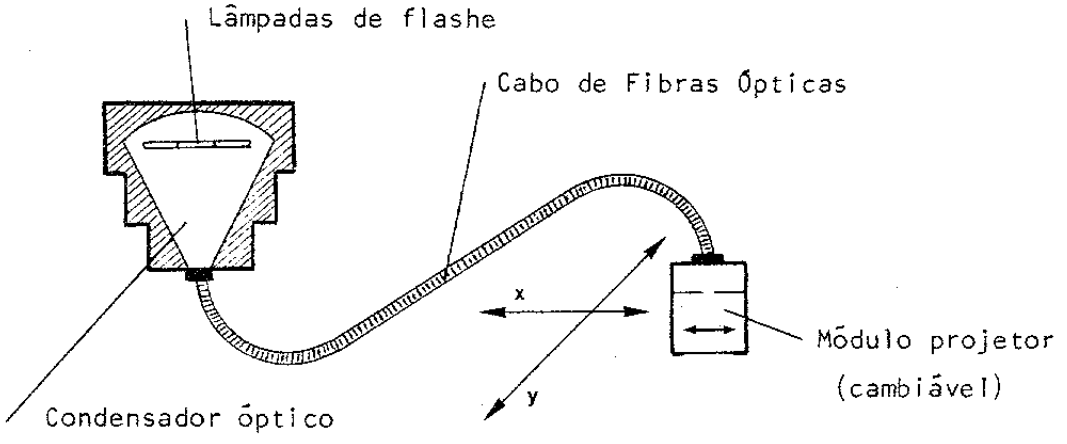


Fig. 1.4 - Sistema óptico do gerador de fotomáscara.

A colocação da fonte de luz fora do coordenatógrafo foi necessária por dois motivos: facilitar a troca dos módulos e evitar esforço excessivo sobre as engrenagens de movimentação.

O projeto e construção da fonte de luz são tratados no Capítulo III.

Um sistema elétrico contador de passos acompanha o movimento do módulo projetor na varredura do plano e provoca o disparo periódico das lâmpadas da fonte de luz de acordo com a configuração da máscara a ser gerada.

Na eventual falha de disparo em um quadrado o sistema é autocorretivo e prevê a substituição de lâmpadas queimadas. A descrição de todo o sistema elétrico é feita no Capítulo IV.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) - BEZERRA, P.C. *Programa gerador de máscaras para execução com fotolito.* Campinas, Lab. de Eletrônica e Dispositivos - UNICAMP (Codex a ser publicado).

(2) - SOUSA, Manoel F. de *Gerador automático de máscaras para confecção de circuitos integrados. I - Sistema de posicionamento digital.* Campinas, Fac. Engª Campinas, 1978 tese (Mest. Ciênc.) - Fac. Engenharia de Campinas, UNICAMP (a ser publicada).

(3) - YEW, Nelson C. "Electron-beam pattern generation". *Industrial Research* Chicago, 18(19): 92-95, 1976.

(4) - CHANG, Wilson & BROERS "Electron-beam lithography draws a finer line" *Electronics*, N.Y., 50(10), May, 1977.

CAPITULO 2

Módulos Projetores

2.1 - Introdução

Neste capítulo relatamos algumas considerações preliminares, desenvolvimento do projeto, construção e detalhes de montagem dos módulos projetores utilizados no sistema (ref's. 4 a 15).

2.2 - Considerações Iniciais

Os módulos projetores idealizados para atender às necessidades previstas do gerador de artes finais deveriam ser, antes de tudo, compatíveis em tamanho e peso com os aparatos de corte e alinhamento usados no coordenatógrafo para o "cut & peel" de rubylith, uma vez que substituiriam esses aparatos sem entretanto inutilizá-los ou fazer com que as engrenagens de movimentação do coordenatógrafo viessem a funcionar em regime forçado.

Como ponto de partida para o projeto foram escolhidas objetivas de microscópio capazes de satisfazer às exigências do projeto como, por exemplo : pequena dimensão, pouco peso e correção contra as principais aberrações ópticas em um campo de dimensão conveniente. Além dessas características, todo o encapsulamento metálico em que vêm contidas as lentes é feito com alta precisão de excentricidade, garantindo, assim, o seu alinhamento no sistema mecânico do coordenatógrafo.

Com a utilização dessas objetivas, os módulos apresentariam uma estrutura muito simples, constituída apenas de um objeto (um quadrado transparente em fotolito) e a objetiva.

2.3 - Caracterização das Objetivas

2.3.1 - Modelo Matemático

Foram adquiridos, inicialmente, dois conjuntos de objetivas marca PZO (Polskie Zaklady Optyczne) com as características nominais dadas pela Tabela 1.

CONJUNTO PZO-5	CONJUNTO PZO-10
Fator de ampliação: 5X	Fator de ampliação: 10X
Abertura numérica: 0,15	Abertura numérica: 0,24
Distância objetiva-ocular: 160 mm	Distância objetiva-ocular: 160mm

Tabela 1 - Características nominais das objetivas PZO-5 e PZO-10.

Além desses dados, para o projeto, foi necessário um modelamento dessas objetivas que exigiu a determinação de alguns parâmetros característi - cos não fornecidos pelo fabricante.

Foi desenvolvido um método para a determinação do comprimento fo - cal e da distância entre os planos principais unitários, que passamos a descre ver.

Se considerarmos uma objetiva como uma lente simples delgada, pode mos utilizar as relações seguintes, para determinar as posições do objeto e imagem em relação ao sistema que engloba a lente.

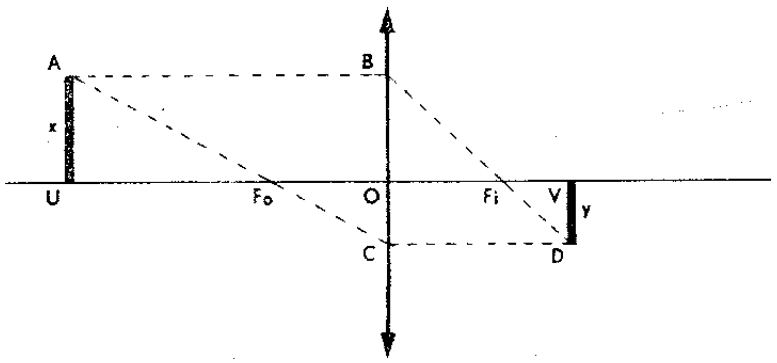


Fig. 2.1 - Definição dos parâmetros de uma lente simples delgada.

Considerando:

$\overline{OU} = u$

$\overline{OV} = v$

$\overline{OF_o} = \overline{OF_i} = f$

ou seja:

u = distância lente-objeto
v = distância lente-imagem
f = comprimento focal da lente (simétrica)

Pela equação dos pontos conjugados:

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \qquad (2.1)$$

e devido à simetria dos triângulos:

$(BOF_i \sim BCD)$ e $(COF_o \sim CBA)$

que justifica a relação:

$$\frac{y}{x} = \frac{v}{u} = R \qquad (2.2)$$

onde R é chamado de fator de ampliação da lente, chegamos às expressões:

$$v = f(1 + R) \qquad (2.3)$$

e

$$u = f\left(1 + \frac{1}{R}\right) \qquad (2.4)$$

Portanto, a distância total de objeto a imagem é:

$$D = f\left(2 + R + \frac{1}{R}\right) \qquad (2.5)$$

que é válida somente para o caso de uma lente simples delgada.

As lentes espessas devem ter seu comportamento analisado a partir de um modelo completo, em que é levada em consideração a existência de dois planos ópticos, chamados planos principais unitários, em relação aos quais são medidas as distâncias de objeto e imagem.

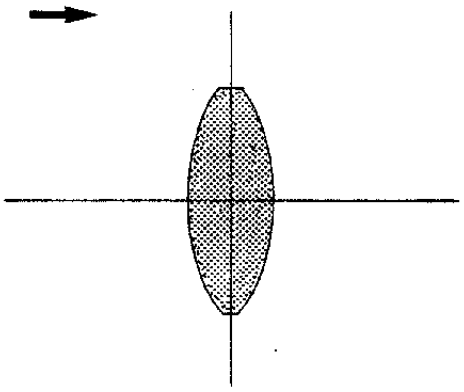


Fig. 2.2 - Lente espessa.

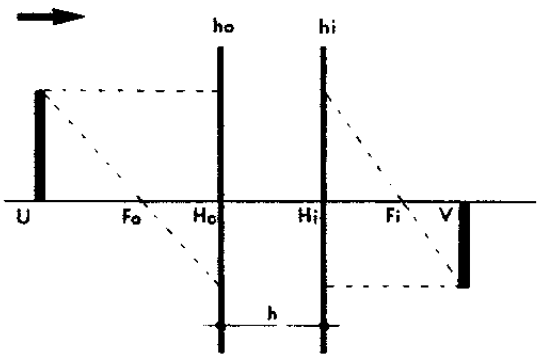


Fig. 2.3 - Modelo equivalente da lente espessa para definição dos seus parâmetros.

Na figura 2.2 temos o desenho de uma lente simples espessa e na figura 2.3 o seu modelo equivalente, mostrando as posições do objeto, imagem e planos principais unitários.

Assim:

h_o = plano principal objeto

h_i = plano principal imagem

$u = H_oU$ = distância plano principal objeto-objeto

$v = H_iV$ = distância plano principal imagem-imagem

$f = H_oF_o = H_iF_i$ = comprimento focal da lente.

A determinação geométrica da imagem ou objeto nesse modelo de lente é a mesma que no caso de uma lente delgada se fizermos coincidir os dois

planos principais unitários e portanto todas as relações básicas da óptica geométrica lhe são aplicáveis. Apenas deve ser levada em consideração a distância entre os planos unitários na distância total de objeto a imagem.

$$D' = f(2 + R + \frac{1}{R}) + h \qquad (2.6)$$

Pode ocorrer um valor negativo para h, significando que os planos unitários estão invertidos nos seus posicionamentos (planos cruzados).

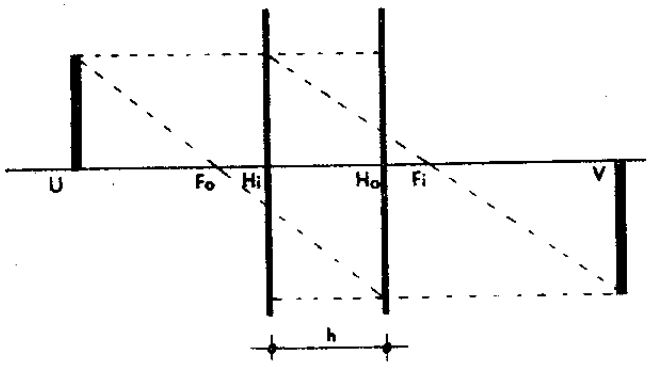


Fig. 2.4 - Situação de planos cruzados: $h < 0$.

O método que utilizamos para a determinação dos comprimentos focais e das distâncias entre os planos principais unitários das objetivas disponíveis, baseia-se na relação (2.6).

Consideremos duas situações de posição objeto-imagem para as quais:

$$D_i = f\left[2 + R_i + \frac{1}{R_i}\right] + h$$

$$D_{i+1} = f\left[2 + R_{i+1} + \frac{1}{R_{i+1}}\right] + h$$

A variação da distância entre objeto e imagem observada ao mudar-

mos o sistema da situação i para $i+1$ será:

$$D_{i+1} - D_i = f \left[R_{i+1} - R_i + \frac{1}{R_{i+1}} - \frac{1}{R_i} \right]$$

Fazendo, nessa expressão:

$$D_{i+1} - D_i = \Delta D$$

$$R_{i+1} - R_i = \Delta R$$

chegamos à expressão:

$$f = \frac{\Delta D}{\Delta R} \left[\frac{R_{i+1} \cdot R_i}{R_{i+1} \cdot R_i - 1} \right] \qquad (2.7)$$

que leva à determinação do comprimento focal a partir dos fatores de ampliação nas situações i e $i+1$.

Essa mesma expressão pode ser escrita em função das dimensões das imagens nas duas situações, considerando que o objeto permaneça o mesmo.

$$f = \frac{\Delta D}{\Delta y} \left[x \frac{y_{i+1} \cdot y_i}{y_{i+1} \cdot y_i - x^2} \right] \qquad (2.8)$$

onde:

x = dimensão do objeto

y = dimensão da imagem

$\Delta y = y_{i+1} - y_i$

A aplicação do método é simples dada a facilidade das medições envolvidas e é relativamente preciso pela minimização do número de parâmetros medidos. Nas diversas situações i, i+1,... etc., a dimensão do objeto (x) mantida constante, não contribui para a propagação de erros no decorrer da aplicação do método; o deslocamento relativo entre os planos objeto e imagem (ΔD) efetuado na mudança de uma situação para outra pode ser controlado de modo a se manter praticamente constante com a utilização de um relógio comparador micrométrico e a dimensão da imagem formada em cada situação (y_i) pode ser de-

terminada com a utilização de uma ocular reticulada ou pela medição de um filme impressionado.

2.3.2 - Equipamento Utilizado nas Medidas

- Banco óptico
- Fonte de luz
- Visor
- Relógio comparador
- Microscópio

O banco óptico utilizado, cujas dimensões e detalhes se encontram na referência 1, permite o alinhamento dos diversos componentes envolvidos na montagem, paralelismo dos planos objeto e imagem e dos planos em que se encontram o visor e a própria objetiva sob teste. Além disso facilita a medição dos deslocamentos longitudinais relativos dos componentes.

Como fonte de luz utilizamos uma lâmpada incandescente de 40W atrás de um vidro despolido (difusor).

O visor é formado por uma ocular de microscópio focalizada num plano que definimos como plano imagem:

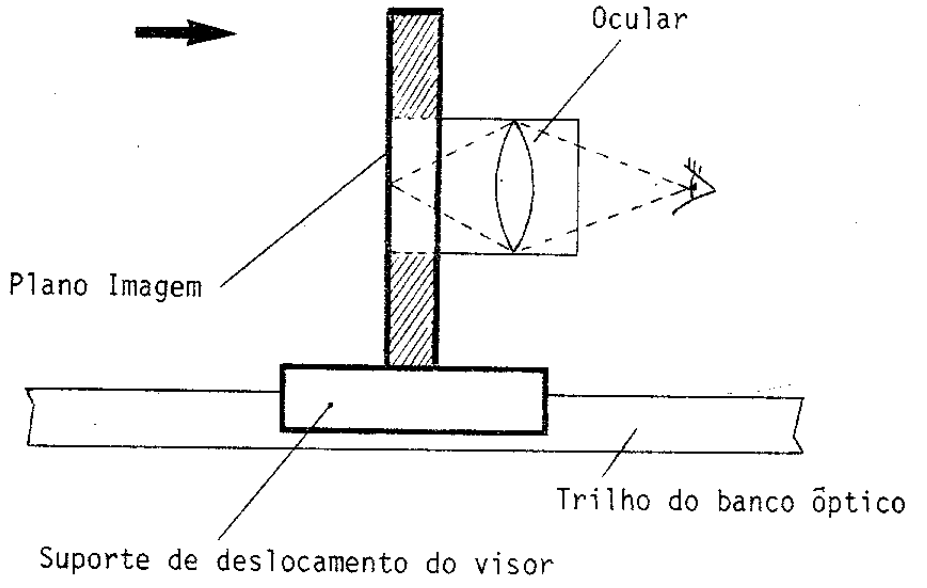


Fig. 2.5 - Visor utilizado na montagem.

Utilizamos um relógio comparador com precisão de 0,005 mm, para a medição dos deslocamentos longitudinais.

As imagens obtidas no decorrer do experimento, em filme gráfico (Kodalith Ortho-3) foram medidas com a utilização de um microscópio (Leitz).

2.3.3 - Procedimento Experimental

Inicialmente, para uma distância qualquer D_o de objeto a imagem, ajustamos a posição da objetiva até a imagem em foco, deslizando sobre os trilhos do banco óptico, o suporte da objetiva no sentido longitudinal.

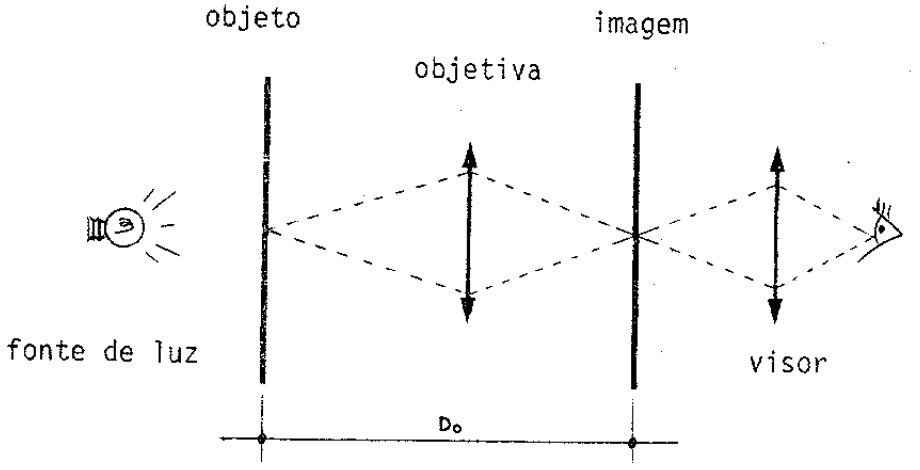


Fig. 2.6 - Situação do sistema na montagem inicial.

O foco é verificado por meio do visor focalizado no plano imagem.

Uma vez focalizada a imagem, é colocado um filme de alto contraste (fotolito) no plano imagem e é feita uma exposição de luz (30 segundos com uma lâmpada incandescente de 40W). Após o processamento fotográfico do filme a dimensão da imagem é medida no microscópio.

Após a obtenção da primeira imagem, o plano objeto é deslocado de ΔD (fixado em $10{,}00 \pm 0{,}005$)mm como mostra a figura 2.7.

A medição do deslocamento (ΔD) é feita com o relógio comparador como mostra a figura 2.7.

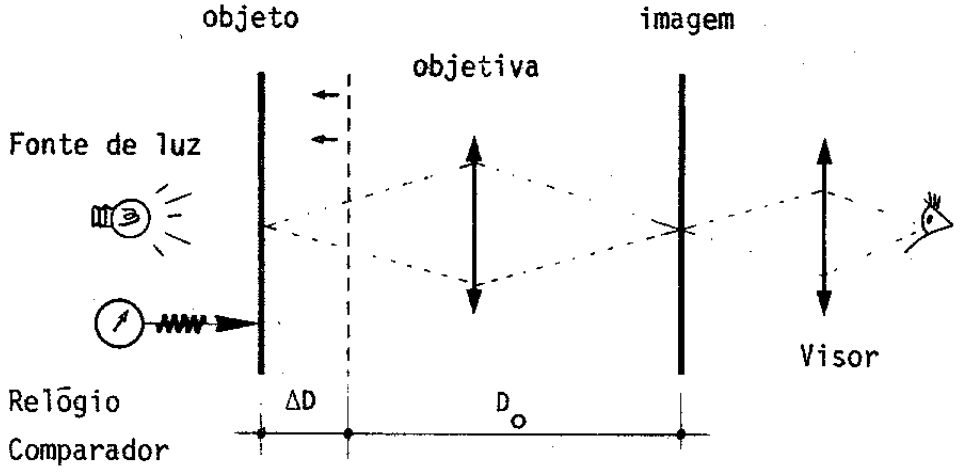


Fig. 2.7 - Obtenção da segunda imagem pelo deslocamento relativo dos planos objeto e imagem.

A partir daqui o processo é repetitivo, ou seja, a objetiva é reajustada até a focalização da imagem, um filme é colocado no plano imagem, sensibilizado e processado. Desse modo tem-se, então, uma imagem para cada distância entre os planos objeto e imagem.

2.3.4 - Resultados Experimentais

A esse método foram submetidas as objetivas PZO-5 e PZO-10.

Os resultados obtidos são mostrados a seguir:

O objeto usado na caracterização da objetiva PZO-5 foi um quadrado transparente em "rubylith" com $(2{,}037 \pm 0.0005)$mm de lado.

Para a caracterização da PZO-10, o objeto foi um quadrado com $(0{,}823 \pm 0{,}0005)$mm de lado.

Em ambos os casos, fixou-se $\Delta D = (10{,}00 \pm 0{,}005)$mm (relógio comparador).

O filme utilizado para a gravação das imagens foi do tipo: Kodalith Ortho-3 (10 ASA).

O processamento fotográfico foi o seguinte:

Revelador: Kodalith (A+B)
Tempo de Revelação: 4 min.
Tempo de Fixação: > 4 min.
Temperatura de Banhos ≃ 20°C

As relações obtidas entre distância objeto-imagem, dimensão da imagem e comprimento focal calculado pela relação (2.8) para as duas objetivas estão nas Tabelas 2 e 3.

y_i (mm)	y_{i+1} (mm)	f (mm)
3,39 ± 0,005	4,49 ± 0,005	25,5 ± 1,7
4,49 ± 0,005	5,38 ± 0,005	27,7 ± 2,2
5,38 ± 0,005	6,22 ± 0,005	26,1 ± 2,1
6,22 ± 0,005	7,08 ± 0,005	26,0 ± 2,1
7,08 ± 0,005	7,91 ± 0,005	26,4 ± 2,1

Tabela 2 - Dados referentes à caracterização da objetiva PZO-5.

y_i (mm)	y_{i+1} (mm)	f (mm)
4,13 ± 0,005	4,64 ± 0,005	16,4 ± 2,2
4,64 ± 0,005	5,17 ± 0,005	15,8 ± 2,0
5,17 ± 0,005	5,72 ± 0,005	15,2 ± 1,9
5,72 ± 0,005	6,24 ± 0,005	16,0 ± 2,1
6,24 ± 0,005	6,77 ± 0,005	15,5 ± 2,0

Tabela 3 - Dados referentes à caracterização da objetiva PZO-10.

A dispersão que se observa nos valores de f, em ambos os casos, é devida à variação do tamanho da imagem dentro do intervalo de melhor focalização (profundidade de foco) do sistema, que por sua vez é função também do fator de ampliação em que opera a objetiva. No experimento realizado essa dispersão foi significativa porque as objetivas sob teste operaram no sentido de am-

pliar a imagem projetada.

Outro experimento, utilizando o método demonstrado (referência 2), chegou a resultados em que a dispersão obtida foi insignificante em consequência da utilização das objetivas no sentido de reduzir a imagem projetada (profundidade de foco menor).

Dentro da faixa de valores medidos no experimento, temos para as duas objetivas os comprimentos focais:

Objetiva PZO-5 $\quad f_{(5)} = \left[26,34 \begin{array}{l} + \ 3,56 \\ - \ 2,54 \end{array} \right]$ mm

Objetiva PZO-10 $\quad f_{(10)} = \left[15,78 \begin{array}{l} + \ 2,82 \\ - \ 2,48 \end{array} \right]$ mm

A determinação do erro no valor dos comprimentos focais das objetivas serviu como indicação da faixa de ajuste a ser considerada no projeto dos módulos projetores. Assim, as distâncias de objeto a objetiva e de objetiva a plano imagem, são afetadas pela incerteza em f através do fator de ampliação:

$$\Delta u = \Delta f \left(1 + \frac{1}{R}\right) \tag{2.9}$$

$$\Delta v = \Delta f \left(1 + R\right) \tag{2.10}$$

Uma vez conhecida a ordem de grandeza da faixa de ajuste a ser considerada, assumimos, para simplicidade dos cálculos subsequentes, os valores médios dos comprimentos focais encontrados.

Assim:

$\overline{f}_{(5)} = 26,4$ mm

$\overline{f}_{(10)} = 15,8$ mm

A distância entre os planos principais unitários (h) é determinada pela diferença entre a distância de objeto a imagem medida e a calculada segundo a relação (2.5) que considera os planos coincidentes (figura 2.8).

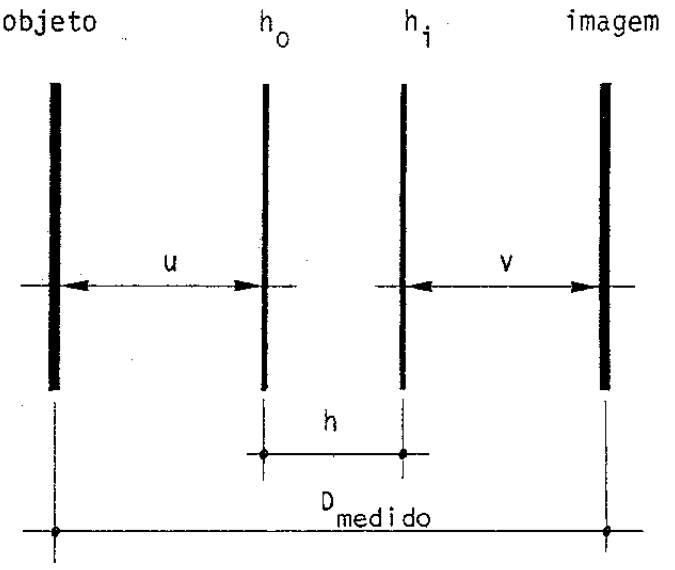


Fig. 2.8 - Esquema ressaltando a influência de h no valor medido de D.

$$D\Big|_{h=0} = v + u = f\left(2 + R + \frac{1}{R}\right)$$

$$h = D_{medido} - D\Big|_{h=0} \qquad (2.11)$$

Os valores de D_{medido} que geraram a Tabela 4 foram obtidos do mesmo experimento que levou à determinação dos comprimentos focais pelo simples estabelecimento de D_o em ambos os casos.

Assim, para:

Objetiva PZO-5 ——— $D_o = (125{,}30 \pm 0{,}005)$ mm

Objetiva PZO-10 ——— $D_o = (106{,}05 \pm 0{,}005)$ mm

os valores de D_o foram medidos com o relógio comparador já mencionado.

Como a incerteza no valor do comprimento focal em cada caso é muito maior que o erro nas medidas de D, e uma vez estabelecida a ordem de grandeza dos ajustes, os cálculos de h nos vários casos foram feitos assumindo para

comprimentos focais os valores médios já estabelecidos.

PZO-5			PZO-10		
D_{medido}	$D_{h=0}$	h(5)	D_{medido}	$D_{h=0}$	h(10)
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
125,30	124,38	0,91	106,05	119,25	-13,20
145,30	143,70	1,59	155,30	164,91	- 9,61
165,30	163,97	1,33	204,52	214,59	-10,07

Tabela 4 - Medidas relativas às distâncias entre os Planos Principais Unitários para as objetivas PZO-5 e PZO-10.

Assumimos então os valores médios dos valores encontrados:

$\overline{h}(5) = 1,3$ mm

$\overline{h}(10) = -10,9$ mm (planos cruzados)

As posições relativas dos planos principais unitários nos encapsulamentos das objetivas foram determinados através da relação entre as distâncias: objeto-objetiva e objeto-plano principal objeto.

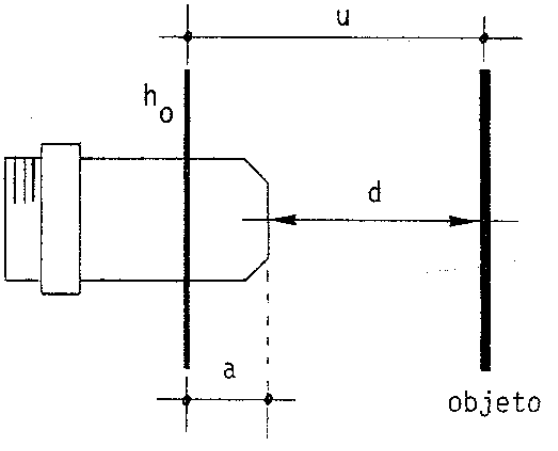


Fig. 2.9 - Posição relativa do objeto à objetiva (d).

$u = f(1 + \frac{1}{R})$ = distância objeto-plano principal objeto (h_o)

d = distância da objetiva ao plano do objeto.

a = posição relativa do plano principal objeto à extremidade externa da objetiva.

Para a determinação de u e a, procedemos do seguinte modo:

Inicialmente, com um relógio comparador, fixamos a distância de objeto a imagem (figura 2.10).

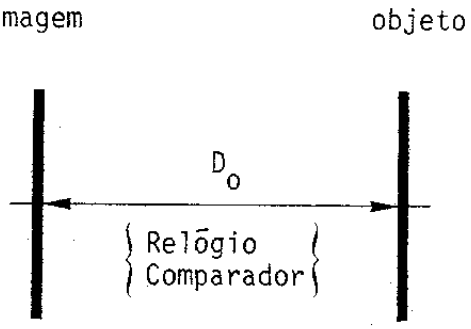


Fig. 2.10 - Distância objeto-imagem inicial.

Em seguida a objetiva é colocada de encontro ao plano objeto, tendo assim, a sua posição em relação ao plano imagem, bem determinada (D_o) (figura 2.11).

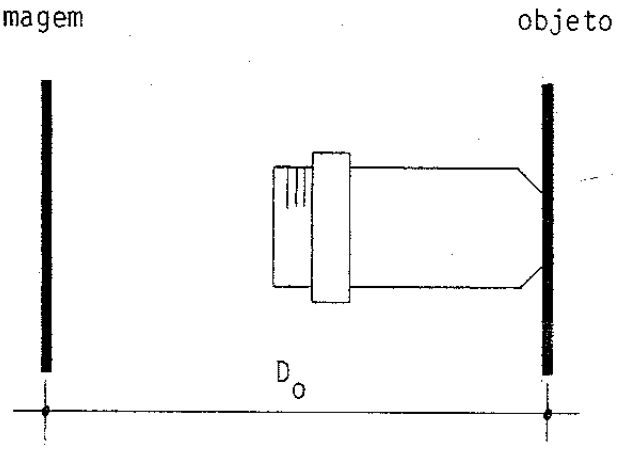


Fig. 2.11 - Estabelecimento da distância inicial objetiva-plano imagem.

Uma vez fixada a objetiva, o plano objeto é deslocado de uma distância d (para a direita) até a focalização da imagem, verificada no visor (figura 2.12).

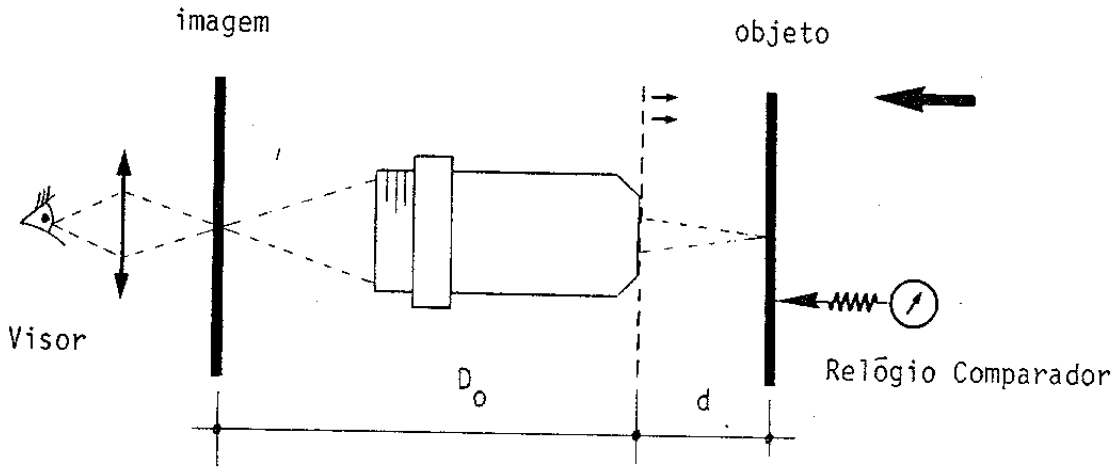


Fig. 2.12 - Medição de d.

Com a imagem em foco, é feita uma esposição de luz sobre um filme colocado no plano imagem; nas mesmas condições já descritas na página 2.8. Desse modo, medindo-se as dimensões de objeto e imagens formadas, calculamos o fator de ampliação (R) para cada distância de objeto a imagem.

A partir daí foram geradas as Tabelas 5 e 6.

D(mm)	d(mm)	R	u(mm)	a(mm)
100,00	19,93	1,97	39,80	19,87
150,00	13,73	3,76	33,42	19,69
200,00	11,33	5,68	31,04	19,71
250,00	10,40	7,45	29,94	19,54

Tabela 5 - Dados referentes à objetiva PZO-5.

D(mm)	d(mm)	R	u(mm)	a(mm)
100,00	6,05	5,31	18,77	12,72
150,00	5,30	8,25	17,71	12,41
200,00	4,52	11,40	17,18	12,66

Tabela 6 - Dados referentes à objetiva PZO-10.

A partir dos dados das Tabelas 5 e 6, obtivemos:

$\overline{a}_{(5)} = 19,7$ mm

$\overline{a}_{(10)} = 12,6$ mm

Com isso obtivemos as características das objetivas que estão mostradas nas figuras 2.13 e 2.14.

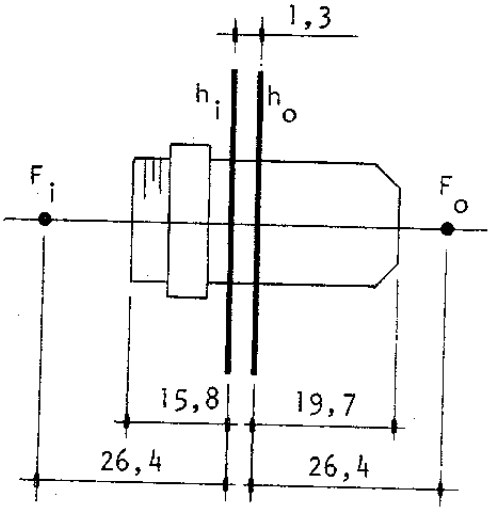


Fig. 2.13 - Dimensões e características da objetiva PZO-5.

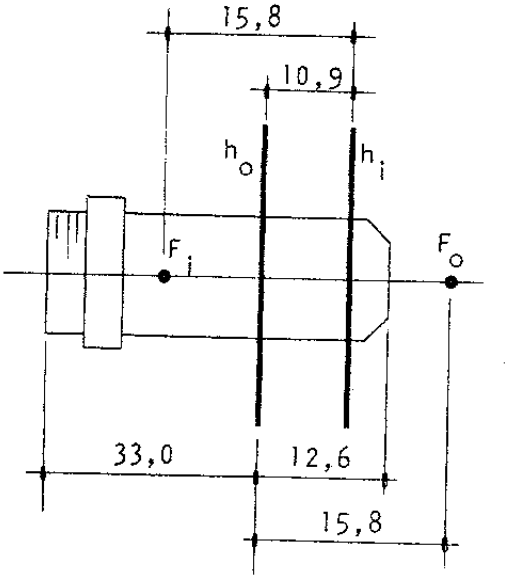


Fig. 2.14 - Dimensões e características da objetiva PZO-10.

2.4 - Determinação dos Objetos e Objetiva

Com os parâmetros f e h conhecidos, foram traçadas as curvas que relacionam as distâncias de objeto a imagem com o fator de ampliação, (expressão 2.6) para as duas objetivas (figura 2.15).

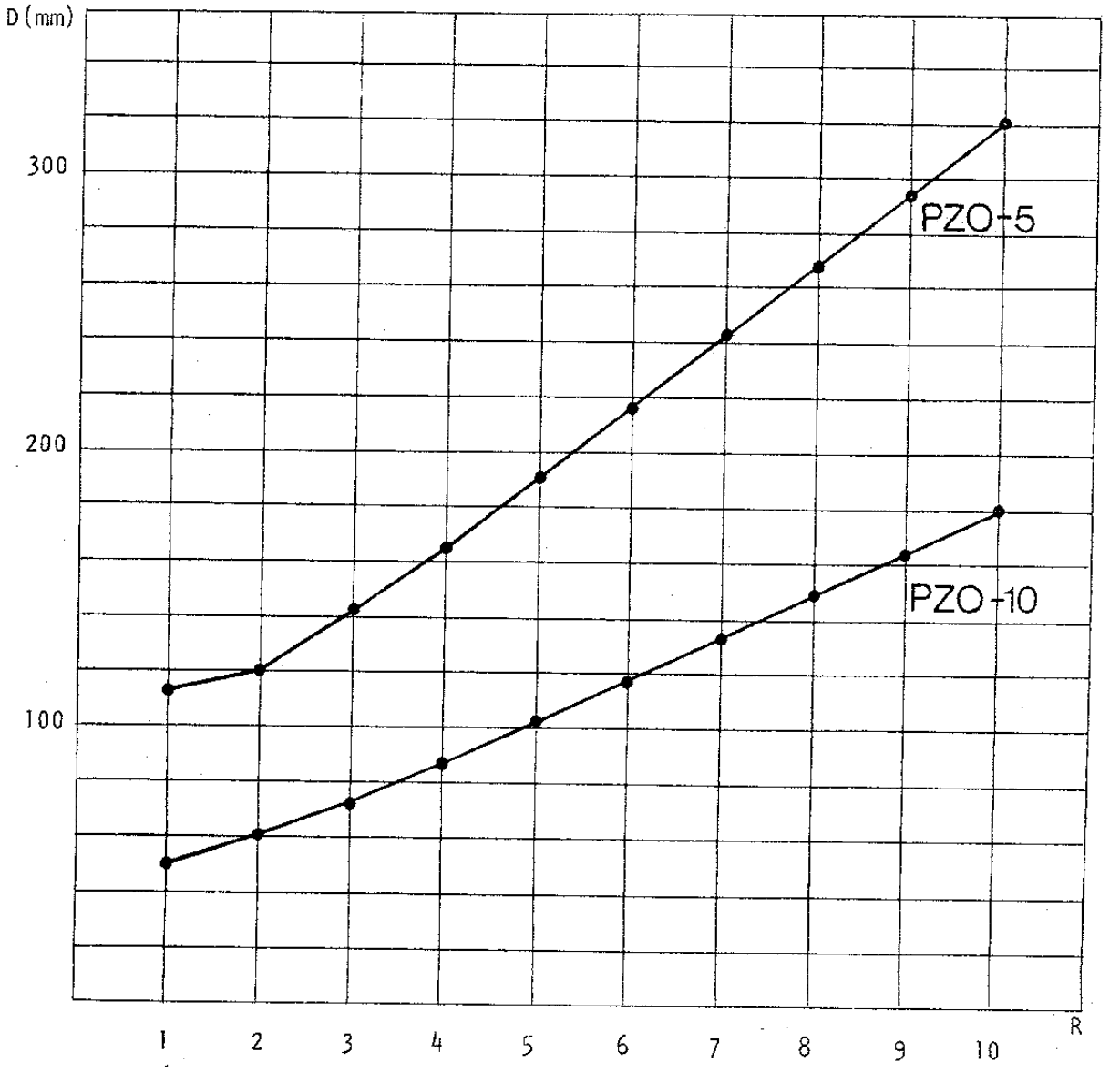


Fig. 2.15 - Gráfico R versus D para as objetivas PZO-5 e PZO-10.

A objetiva PZO-5 opera com fatores de ampliação bem menores que a ob

jetiva PZO-10, e por conseguinte maior brilho da imagem, para uma mesma fonte de luz, minimização dos ajustes longitudinais nos módulos, etc.

As áreas dos objetos (quadrados) a serem usados nos módulos projetores foram escolhidas dentro de um intervalo limitado pelo diâmetro do cabo de fibras ópticas, usado no acoplamento à fonte de luz e pelo ponto de operação das objetivas. Desse modo, sendo o diâmetro do cabo de fibras ópticas 3,2 mm, o maior objeto possível é um quadrado de lado 2,26 mm.

Fixamos, entretanto, o maior lado em 2,0 mm e para a projeção do conjunto de imagens estabelecido (quadrados com 1, 2, 3, 4 e 5 mm de lado) foi escolhida a objetiva PZO-5 que, na faixa de ampliações necessárias, opera em melhores condições que a PZO-10. Na Tabela 7 comparamos as duas objetivas.

PZO-5		PZO-10		
Objeto	R	Objeto	R	Imagem
0,5	2	0,2	5	1
1	2	0,4	5	2
2	1,5	0,6	5	3
2	2	0,8	5	4
2	2,5	1	5	5

Tabela 7 - Os valores indicados nas colunas: objeto e imagem são lados de quadrados em mm e R é o fator de ampliação.

As objetivas foram usadas no sentido de ampliar o objeto projetado para permitir maior profundidade de foco, tornando, assim, o sistema menos sensível às ondulações apresentadas pelo filme colocado sobre a mesa do coordenatógrafo.

2.5 - Construção dos Módulos

Todas as partes constituintes dos módulos foram construídas em nylon ou alumínio para a minimização de peso.

O esquema básico é mostrado na figura 2.16.

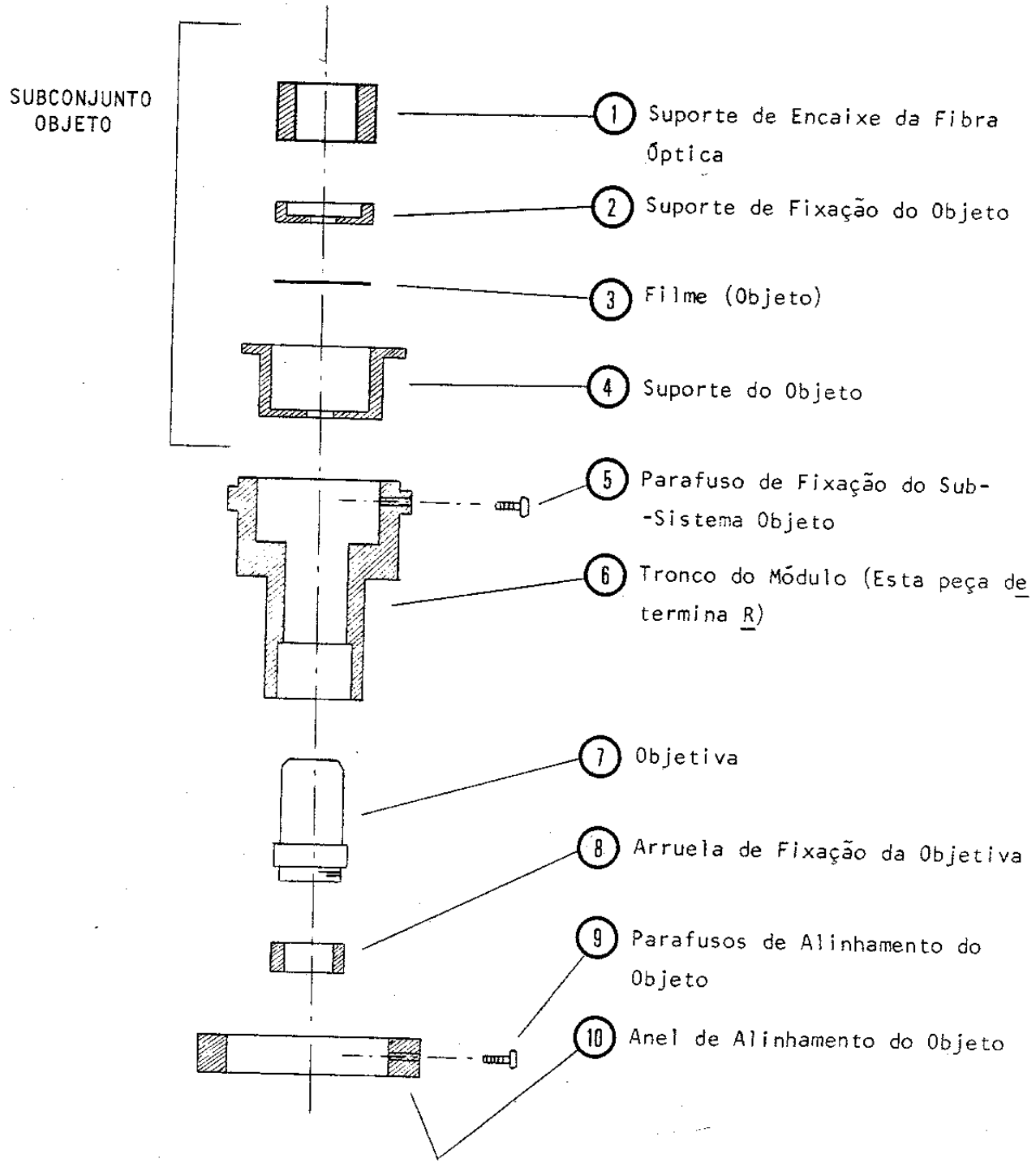


Fig. 2.16 - Esquema básico de um módulo projetor.

De todas as partes que constituem um módulo somente as dimensões do "tronco do módulo" (6) definem o fator de ampliação com que deve operar a objetiva; todas as demais são comuns a todos os módulos. O dimensionamento dos troncos dos módulos para cada fator de ampliação determinado baseia-se nas relações extraídas das figuras 2.17 e 2.18.

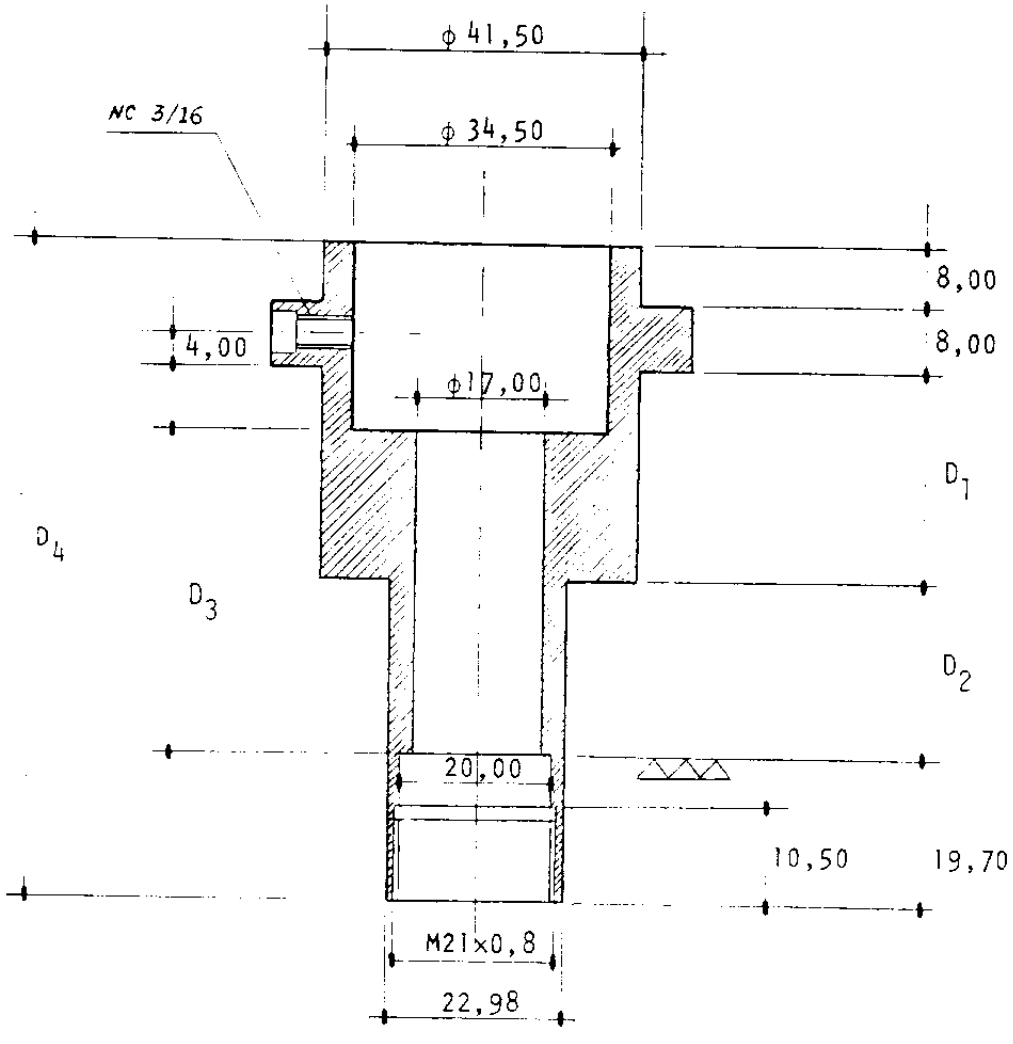


Fig. 2.17 - Tronco do Módulo. Parâmetros que determinam o fator de ampliação.

Os parâmetros D_1, D_2, D_3 e D_4 podem ser calculados a partir das dimensões da objetiva PZO-5 como mostra a figura 2.18.

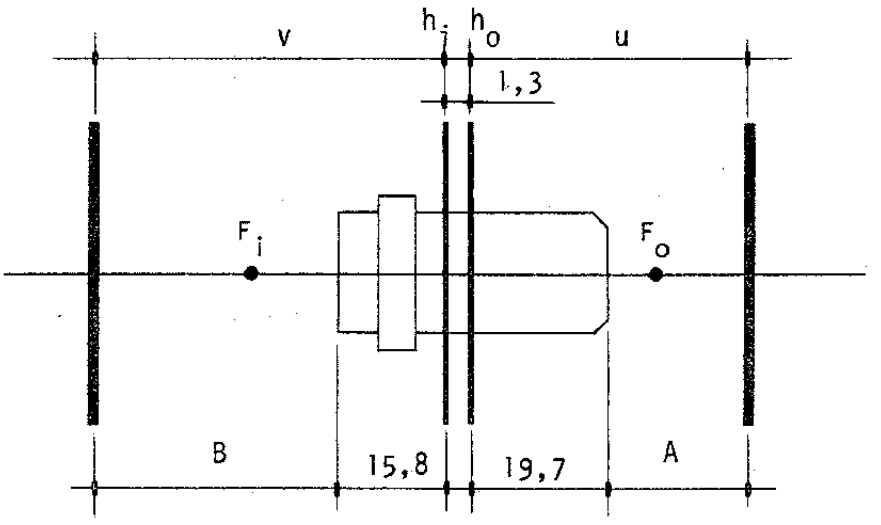


Fig. 2.18 - Dimensões características da objetiva PZO-5.

$$u = f(1 + \frac{1}{R}) \qquad A = 26,4\ (1 + \frac{1}{R'}) - 19,7$$

$$v = f(1 + R) \qquad B = 26,4\ (1 + R) - 6,5$$

As relações que determinam os parâmetros mostrados na figura 2.17 são:

$$D_3 = 27,5 + A - 1,5 - \frac{1}{2}(\text{ajuste do objeto})$$

$$D_2 = 108,0 - C + \frac{1}{2}(\text{ajuste da imagem})$$

$$D_1 = D_3 - D_2 + 9,0$$

$$D_4 = 35,7 + D_1 + D_2$$

Fixamos, no projeto, 4,0 mm para o ajuste da imagem e 3,0 mm para o ajuste do objeto, estes valores foram determinados com base nas relações 2.9 e 2.10 e ajustados para maior conveniência do projeto.

Se por acaso a imagem desejada não fosse conseguida nesse campo de ajuste, poderíamos alterar as dimensões do objeto.

Desse modo foi gerada a Tabela 8 que indica as dimensões dos parâmetros indicados na figura 2.17.

Mais detalhes referentes à construção dos módulos podem ser encontrados na referência 3.

	D_1	D_2	D_3	D_4
R	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1,5	7,3	50,5	48,8	93,5
2,0	16,1	37,3	44,4	89,1
2,5	26,7	24,1	41,8	86,5

Tabela 8 - Dimensões de alguns parâmetros característicos dos troncos de módulos.

2.6 - Montagem dos Módulos

O objeto (3), uma película fotográfica cujo formato se mostra na figura 2.19, é colocado no suporte do objeto (4) e fixado por pressão através do suporte de fixação (2). O suporte de fixação se encaixa no suporte do objeto de modo deslizante e a pressão que exerce sobre a película é controlada pela rosca de encaixe do suporte da fibra óptica (1).

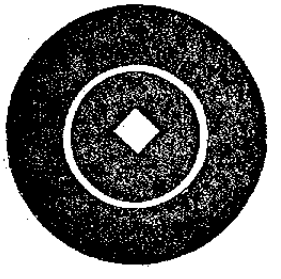


Fig. 2.19 - Formato do filme-objeto (fotolito).

A centralização do quadrado objeto ao conjunto é feita através do círculo transparente interno cujo diâmetro coincide com o diâmetro da abertura inferior do suporte do objeto (4).

Todo o sub-sistema objeto é encaixado de modo deslizante no tronco do módulo (6), permitindo, assim, o ajuste da distância objeto-objetiva (u). Para a sua fixação, após ajuste, são usados três parafusos radiais (5).

A objetiva (7) é fixada ao tronco do módulo através da arruela de fixação (8).

Todo o conjunto formado pelo sub-sistema objeto e pelo tronco com objetiva pode ser ajustado ao longo do eixo, de modo deslizante com o anel de alinhamento, definindo o ajuste da distância objetiva-plano imagem.

Esses dois ajustes são efetuados no banco óptico, em uma montagem em que a distância do visor ao suporte do módulo é a mesma que a do plano do filme, no coordenatógrafo, ao braço onde serão encaixados os módulos. Os esquemas correspondentes estão nas figuras 2.20 e 2.21.

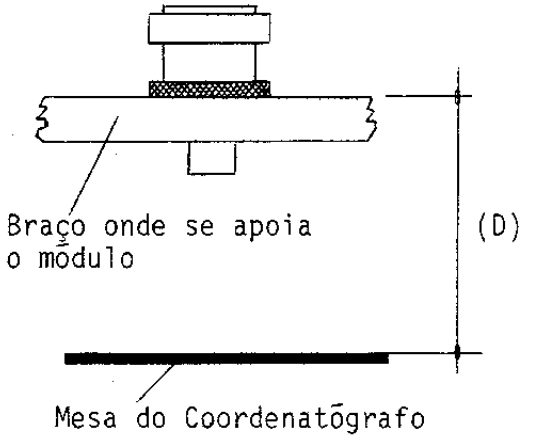


Fig. 2.20 - Posicionamento dos módulos no coordenatógrafo.

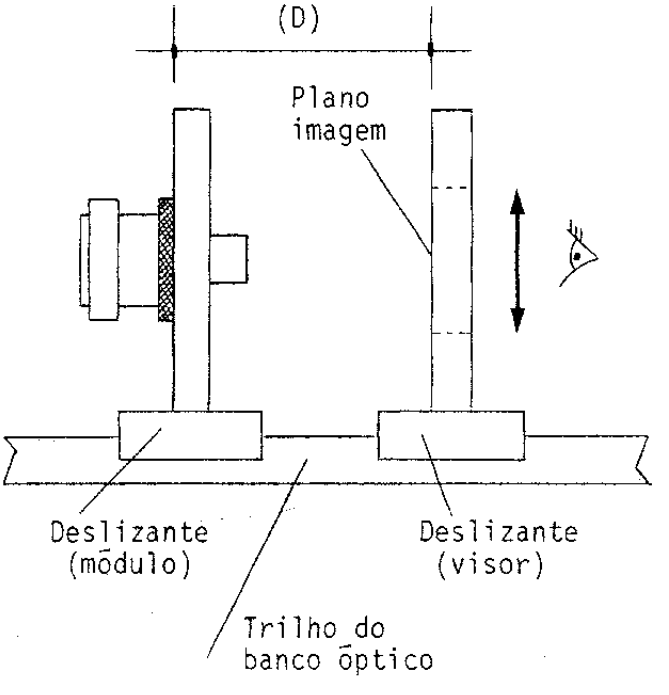


Fig. 2.21 - Alinhamento e centralização na montagem dos módulos.

O suporte do braço do coordenatógrafo onde são encaixados os módulos possui dois pinos guia que garantem o alinhamento da imagem projetada (figura 2.22).

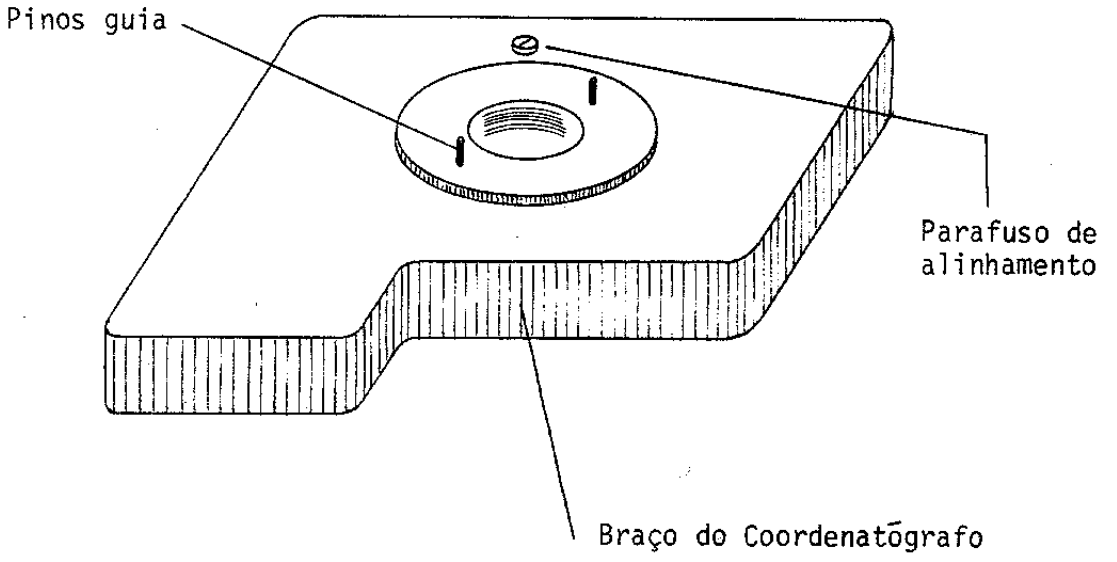


Fig. 2.22 - Suporte, no braço do coordenatógrafo, onde se encaixam os módulos.

Os orifícios onde entram os pinos guia nos módulos, estão no anel de alinhamento do objeto.

O alinhamento angular do quadrado a ser projetado é feito no banco óptico como mostra a figura 2.21, colocando-se um retículo graduado no plano imagem onde está focalizado o visor (figura 2.23).

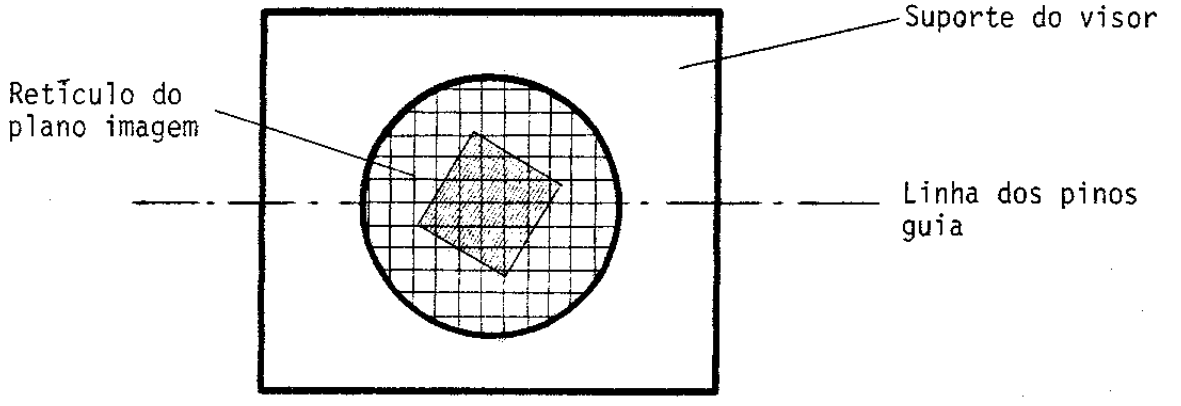


Fig. 2.23 - Alinhamento e calibração do quadrado a ser projetado visto através do visor do banco óptico.

O retículo colocado no plano imagem, foi construído em HRP (High Resolution Plate) e apresenta 0,1 mm entre linhas. A camada de emulsão da HRP está no plano imagem do quadrado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) - REIS, C.A. Projeto de um banco óptico. Campinas, UNICAMP - Lab. de Eletrônica e Dispositivos (Desenho nº FO-001).

(2) - BRITO, Ailton Sousa *Desenvolvimento de um sistema de fotorrepetição de máscaras para circuitos integrados.* Campinas, Fac. de Engenharia 1976 tese (Mest. Ciênc.) - Fac. de Engenharia, Campinas, UNICAMP. (a ser publicada).

(3) - REIS, C.A. Projeto dos módulos projetores. Campinas, UNICAMP - Lab. de Eletrônica e Dispositivos (Desenho nº F1-021).

(4) - HARDY & PERRIN *The principles of optics.* N.Y., McGraw Hill, 1932.

(5) - STRONG, John *Concepts of classical optics.* San Francisco, W.H. Freeman and Company, 1958.

(6) - REIS, C.A.; MAMMANA, C.I.Z.; MAMMANA, A.P. *Desenvolvimento de um sistema automático de geração de máscaras.* Campinas, UNICAMP - Lab. de Eletrônica e Dispositivos, 1976. Codex RE-003. (Estudos Preliminares)

(7) - CONNELY, D. "Focal plane exposure and film speed". *J. Photogr. Sci.*, 23(4): 178-180, 1975.

(8) - McGILL, Arthur "Variation in distortion with magnification". *J. Opt. Soc. Amer.*, Rochester, N.Y., 45(3): 148, 1955.

(9) - CONNELY, D. "The incidente light method of exposure determination". *J. Photogra. Sci.*, 15(2): 55-77. 1967.

(10) - HERRIOT, Donald "Lenses for the photolithographic system". *The Bell System Technical Journal*, N.Y., 49(9), Nov. 1970.

(11) - RAWSON, Eric "Reduction cameras: optical design and adjustment". *The Bell System Technical Journal*, N.Y., 49(9): 2117, Nov., 1970.

(12) - BENNETT, A.H. "The distortion of some typical photographic objectives" *J. Opt. Soc. Amer. & Rev. Sci. Instr.*, Rochester, N.Y., V.14, p. 235, 1927.

(13) - CONNELY, D. "Calibration levels of films and exposure devices." *J. Photogr. Sci.*, 16(5): 185-193, 1968.

(14) - JENKINS & WHILE *Fundamentals of optics*. 3 ed., N.Y., McGraw Hill, 1957.

(15) - SMITH, F.G. & THOMSON, J.H. *Optics*. N.Y., Wiley, 1971.

CAPITULO 3

Fonte de Luz

3.1 - Introdução

Neste capítulo relatamos o desenvolvimento do projeto e construção da fonte de luz do sistema de geração de artes finais (ref's. 10 a 18).

Decorrente do próprio modo de geração de configurações adotado, a fonte de luz iria operar de modo pulsado com uma frequência imposta pelo sistema em função da dimensão do quadrado projetado e da velocidade de desenho. Para a produção desses pulsos luminosos foram utilizadas lâmpadas de descarga gasosa de Xenônio.

Para não sacrificar as engrenagens de movimentação e os barramentos do coordenatógrafo com uma sobrecarga de peso sobre o carro, estabelecemos, a priori, que a fonte de luz deveria ficar fisicamente separada do módulo projetor, acoplados por meio de um cabo de fibras ópticas.

As perdas de intensidade luminosa oriundas desse acoplamento e do próprio módulo projetor foram compensadas até se atingir o objetivo final que era a sensibilização do filme para artes gráficas.

Para chegar ao sistema definitivo, iniciamos com a escolha da lâmpada a ser utilizada. Os circuitos de disparo e alimentação da lâmpada foram estabelecidos em função das suas características, visando a máxima confiabilidade e durabilidade em operação.

A solução definitiva adotada, que consiste de um conjunto de quatro lâmpadas encerradas em um refletor-condensador cônico, emergiu de sucessivas tentativas para sensibilizar o filme gráfico, iluminando o objeto do módulo projetor através de um cabo de fibras ópticas disponível.

3.2 - Lâmpada Utilizada

Visando a máxima facilidade de manutenção do sistema e máxima independência de componentes de vida curta importados optamos pela utilização de lâmpadas de Xenônio comumente usadas em estroboscópios de baixa potência e de fabricação nacional. Tais requisitos foram preenchidos pela lâmpada modelo S-32 de fabricação "FRATA", cujas características nominais são:

Frequência máxima de disparos: 300 Hz
Potência máxima: 10ω
Tensão máxima entre eletrodos: 450 V
Tensão mínima entre eletrodos: 260 V
Tensão de ionização: 15 KV

Com o intuito de nos familiarizarmos com o funcionamento desse tipo de lâmpada foi realizada uma série de testes.

O circuito de carga e disparo utilizado inicialmente é mostrado na figura 3.1.

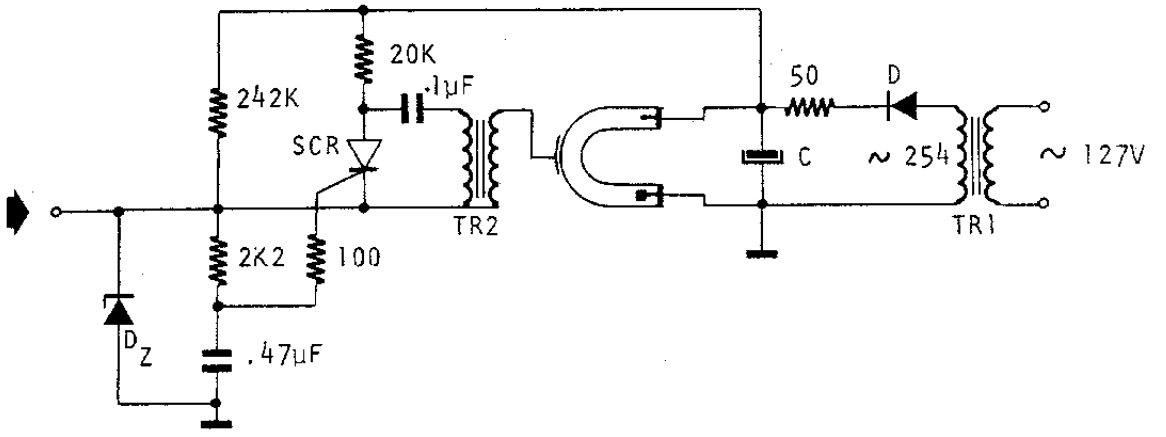


Fig. 3.1 - Esquema do circuito de carga e disparo usado inicialmente nos testes e medidas.

Detalhes sobre o funcionamento desse circuito estão relatados no Capítulo 4.

O frequente rompimento do dielétrico de capacitores eletrolíticos usados na alimentação da lâmpada levou à exclusão do seu uso, dando lugar aos

capacitores de poliester metalizado que apresentam características de auto regeneração, sendo, portanto, mais apropriados para este tipo de circuitos.

Procuramos observar a forma do pulso luminoso produzido no disparo da lâmpada, utilizando como sensor um fototransistor com as características listadas na Tabela 1.

Características	Min.	Tip.	Max.	Unidade
Sensibilidade a radiação de coletor a emissor. V_{CC} = 20V; R_L = 100Ω (base aberta)	0,20	0,45	--	$\frac{mA}{\frac{mW}{cm^2}}$
Tempo de subida de fotocorrente	--	--	2,5	µS
Tempo de descida de fotocorrente	--	--	4,0	µS
Comprimento de onda de máxima sensibilidade	--	0,8	--	µm

Tabela 1 - Características ópticas do fototransistor MRD-150.

A forma do pulso foi observada na tela de um osciloscópio com memória (H.P. - 141-T), segundo o esquema mostrado na figura 3.2.

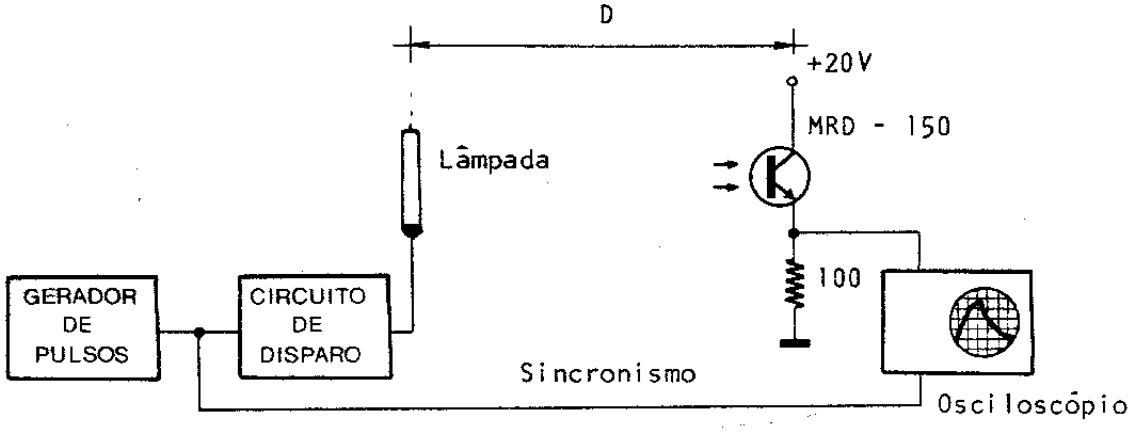


Fig. 3.2 - Observação da forma do pulso luminoso.

A não saturação do fototransistor foi assegurada mantendo-o afastado em relação à lâmpada cerca de 70cm. Comparando a forma do pulso com as características do fototransistor, pudemos notar que a influência do sensor foi significativa, apenas, na subida como se mostra na figura 3.3

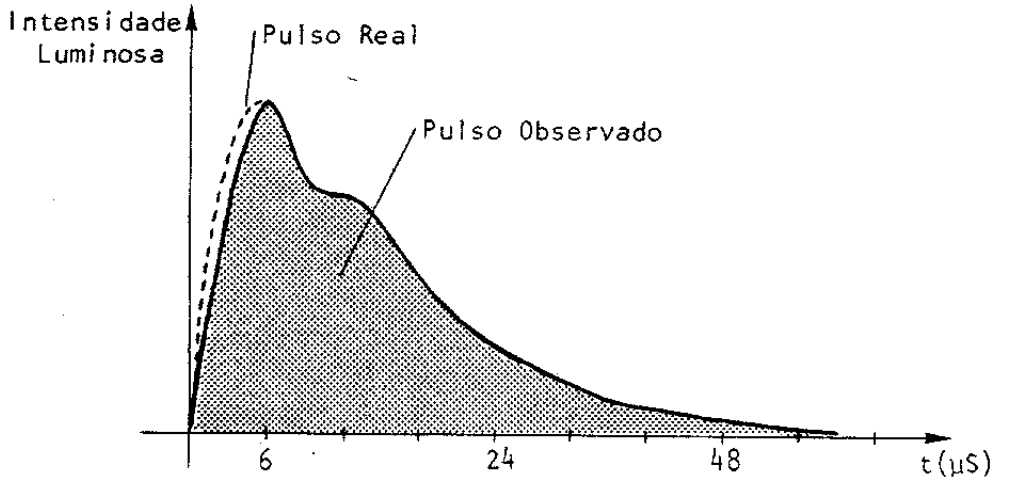


Fig. 3.3 - Influência do foto-transistor na observação da forma do pulso luminoso.

Consideramos aceitável o modo de medição do tempo de duração do flashe. A partir daí foi gerada uma tabela associando o tempo de duração do flashe com a capacitância de alimentação da lâmpada (Tabela 2).

Capacitância (μF)	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Duração-Flashe (μS)	28	27	25	24	22	20	19	16	13	9

Tabela 2 - Tempo de duração do flashe versus capacitância de alimentação da lâmpada.

O tempo de duração do flashe foi medido como sendo o intervalo entre os pontos com amplitude igual a 1/3 da amplitude máxima da forma de onda detetada como sugere Edgerton (ref.1); figura 3.4.

A tensão de alimentação dos capacitores foi mantida em 360V. Este valor de tensão se deve à utilização de um transformador com características (127/254)V x 3A.

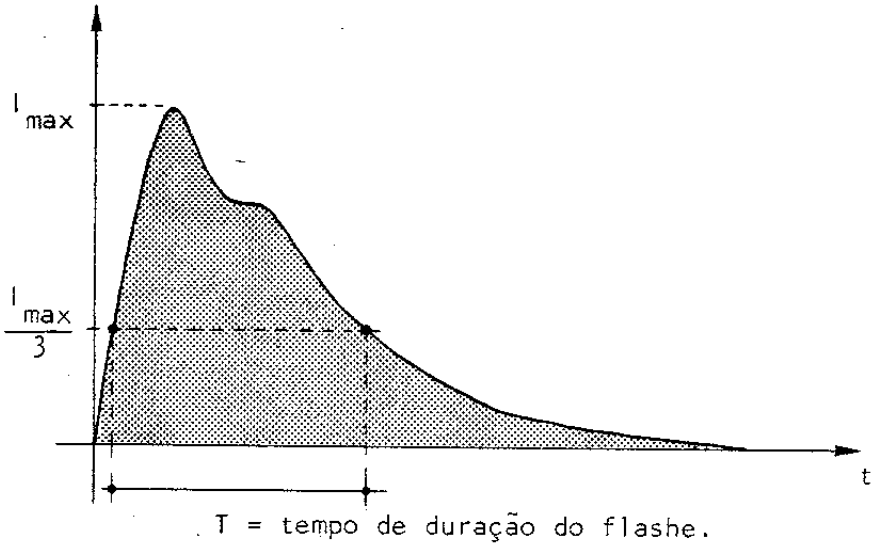


Fig. 3.4 - Definição do tempo de duração do flashe.

A determinação do ponto de operação da lâmpada foi feita da seguinte maneira:

A energia elétrica fornecida à lâmpada por disparo, é:

$$e = \frac{1}{2} CV^2$$

onde C = capacitância de alimentação da lâmpada
V = 360 volts

A lâmpada está limitada em potência em 10 watts, portanto a frequência de disparos e a energia fornecida por disparo estão relacionadas segundo o gráfico da figura 3.5.

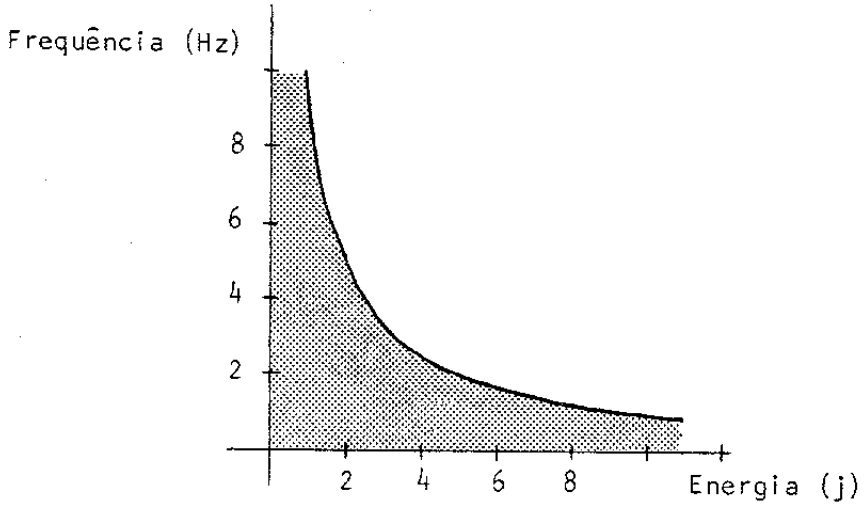


Fig. 3.5 - Frequência de disparo versus energia por disparo.

A determinação da energia por disparo e, portanto, do ponto de operação da lâmpada foi feita segundo um ritual de cálculos para o projeto de circuitos de comando para lâmpadas de flashe sugerido por Markiewicz e Emmett (ref.2) que comentamos a seguir.

3.3 - Determinação da Energia por Disparo

Goncz (ref.3) sugere que a equação que dá o valor da queda de tensão nos terminais de uma lâmpada de flashe de Xenônio, em função de seus parâmetros elétricos e geométricos é a seguinte:

$$V_T = V_e + l.\gamma(J).\frac{\ell}{A} \tag{3.1}$$

onde $\gamma(J)$ é a resistividade do plasma

V_e - queda de tensão nos eletrodos

ℓ - comprimento do arco

A - área interna do tubo

J - densidade de corrente no plasma em A/cm^2

A partir dessa relação, determinou experimentalmente que a resistividade do plasma de Xenônio pode ser representada por:

$$\gamma(J) = 1,13\ \frac{1}{\sqrt{J}}\ \Omega.cm \tag{3.2}$$

e define a resistência do plasma como sendo

$$R = 1,13\ \frac{\ell}{\sqrt{I.A}} \tag{3.3}$$

onde I é a corrente que atravessa o plasma.

Como em geral, $V_e << V_T$ a equação (3.1) pode ser simplificada:

$$V_T \simeq I.\gamma(J)\ \frac{\ell}{A} \tag{3.4}$$

Substituindo (3.2) em (3.4), chegamos à relação:

$$V_T = \frac{1,13\ell}{\sqrt{A}} \cdot \sqrt{I} \qquad (3.5)$$

Markiewicz e Emmett (ref.2) partiram dessa mesma equação, expressa na forma:

$$V_T = \pm K_o |I|^{1/2} \qquad (3.6)$$

onde

$$K_o = \frac{1,13}{\sqrt{A}} \cdot \ell \qquad (3.7)$$

e analisaram o circuito de descarga de uma lâmpada de flashe colocado na forma RLC-série: (figura 3.6).

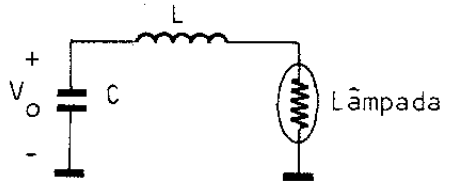


Fig. 3.6 - Circuito de descarga da lâmpada na forma RLC-série.

A equação diferencial não linear do circuito é dada por:

$$L \frac{dI}{dt} \pm K_o |I|^{1/2} + \frac{1}{C} \int_o^i I \, d\bar{\tau} = V_o \qquad (3.8)$$

Podemos normalizá-la por meio das seguintes substituições:

$$Z_o = \frac{L}{C} \qquad I = i \frac{V_o}{Z_o} \qquad \tau = \frac{t}{T}$$

$$T = \sqrt{L.C} \qquad \alpha = \frac{K_o}{V_o . Z_o}$$

e se transforma em:

$$\frac{di}{d\tau} \pm \alpha |i|^{1/2} + \int_0^{\tau} i \, d\bar{\tau} = 1 \qquad (3.9)$$

onde α é o coeficiente de amortecimento.

As soluções dessa equação foram plotadas via computador, como mostra a figura 3.7, e expressam a forma de onda da corrente na lâmpada durante um disparo.

O parâmetro característico de cada forma de onda é o coeficiente de amortecimento α.

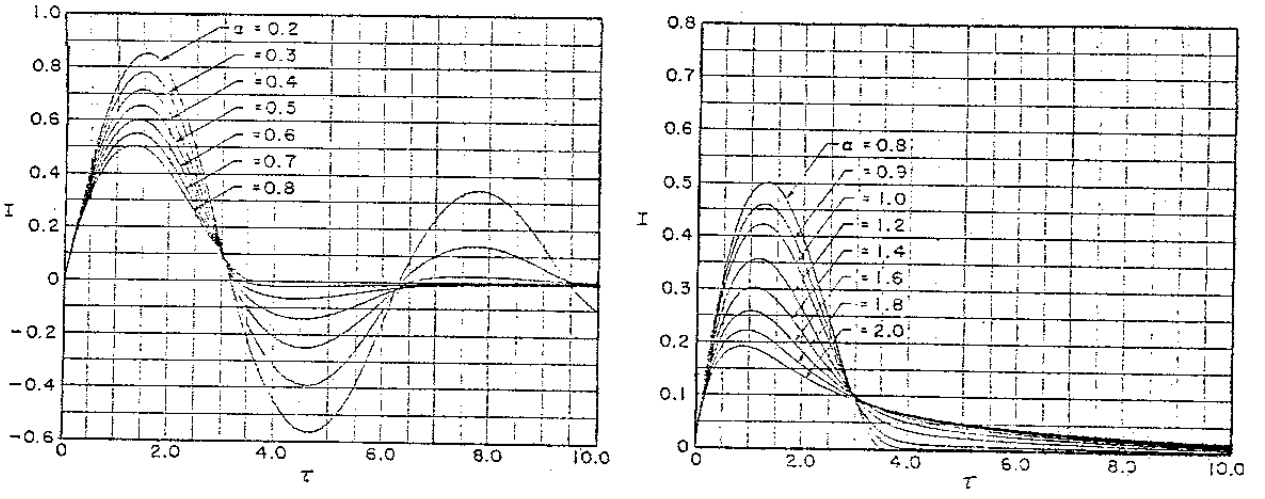


Fig. 3.7 - Formas de onda da corrente na lâmpada durante o flashe.

Para que haja máxima transferência de energia do capacitor para a lâmpada, no disparo, o sistema deve ser amortecido criticamente o que implica em $\alpha \simeq 0,75$.

Baseados nessas informações, otimizamos o circuito de disparo da lâmpada S-32, impondo as seguintes condições:

V_o = 360 volts

α = 0,75

A indutância parasita apresentada pelo circuito foi determinada pela relação

$$L = \left(\frac{t}{\pi} \right)^2 \cdot \frac{1}{C} \qquad (3.10)$$

que, a rigor, é válida somente para o caso de um sistema RLC criticamente amortecido e em que R é constante. Edgerton (ref. 4), entretanto, afirma que é válida para o caso de uma descarga de lâmpada de flashe uma vez que o erro cometido é pequeno.

Assim, com valores extraídos da Tabela 2, determinamos:

$L \simeq 8\ \mu H$

As dimensões ℓ (comprimento do arco) e A (área interna do tubo) da lâmpada, fornecidas pelo fabricante, sob consulta, são:

$\ell = 50mm$

$A = 17,3mm^2$

Substituindo esses valores em (3.7), temos:

$K_o \simeq 13,5\ \Omega.amp^{1/2}$

O cálculo da capacitância decorre de

$$\alpha = \frac{K_o}{\sqrt{V_o . Z_o}} \quad , \quad \text{como} \quad Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

então

$$C = L.V_o^2 \cdot \left(\frac{\alpha}{K_o} \right)^4 \qquad (3.11)$$

impondo $\alpha = 0,75$, temos $C \simeq 10\ \mu F$

Assim, ficou determinado que o ponto de operação da lâmpada seria tal que

$V = 360$ volts

$C = 10\ \mu F$

Consequentemente, devido à sua limitação em potência, a máxima fre

quência de disparos ficou estabelecida em

$$f \cong 15 \text{ Hz}$$

Outro detalhe relevante no projeto de circuitos de disparo de uma lâmpada de flashe é o modo de excitação, ou seja, a maneira como é aplicado um pulso de alta tensão para ionizar o gás no início do disparo.

Hook, Dishington e Hilberg (ref.5) analisam o comportamento de lâmpadas de Xenônio excitadas por pulsos de alta tensão positivos e negativos e concluem que, com a aplicação de pulsos negativos, ocorre maior uniformidade na energia luminosa emitida por disparo além de um considerável aumento no tempo de vida da lâmpada.

Mostram, também, dois circuitos possíveis para a geração desses pulsos: excitação paralela e excitação série; figura 3.8.

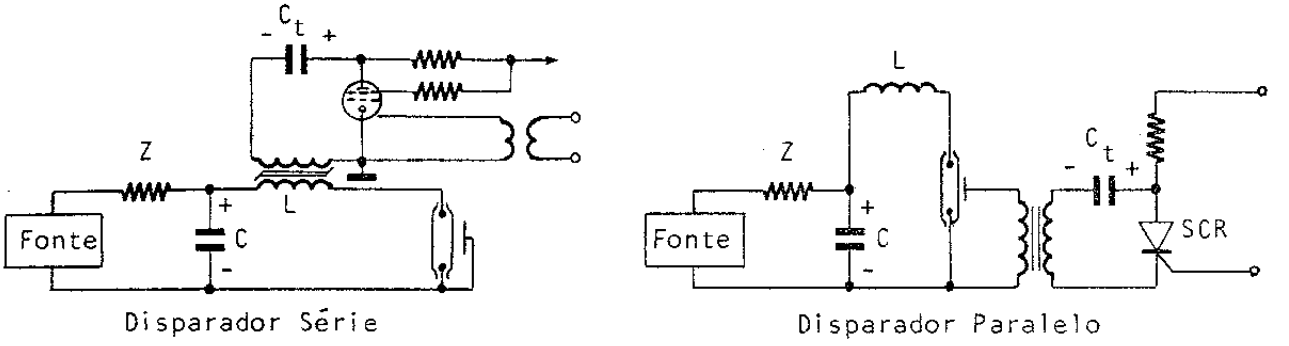


Fig. 3.8 - Circuitos de excitação para lâmpadas de flashe.

Optamos, em nosso sistema, por um circuito de excitação paralela pela sua maior facilidade de realização. O circuito é mostrado na figura 3.9.

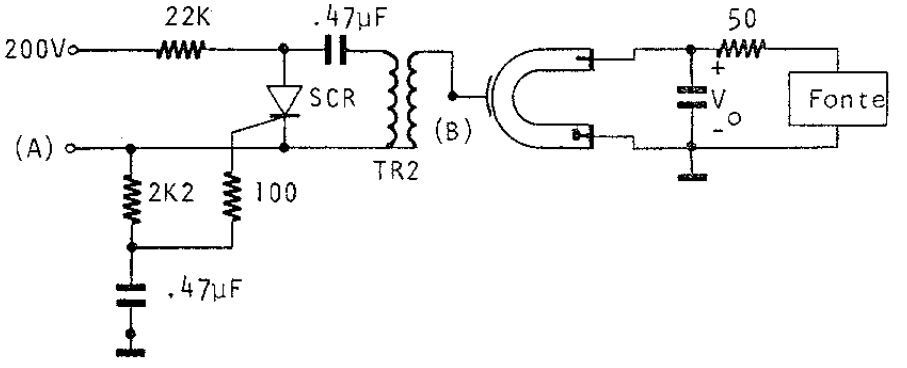


Fig. 3.9 - A uma transição negativa de 10V em (A), corresponde um pulso negativo de 15 KV em (B).

Com apenas uma lâmpada, operando nas condições estabelecidas, contida em um copo metálico acoplado diretamente a um módulo projetor com fator de ampliação 5X (figura 3.10), foi feita a primeira tentativa de sensibilizar o filme.

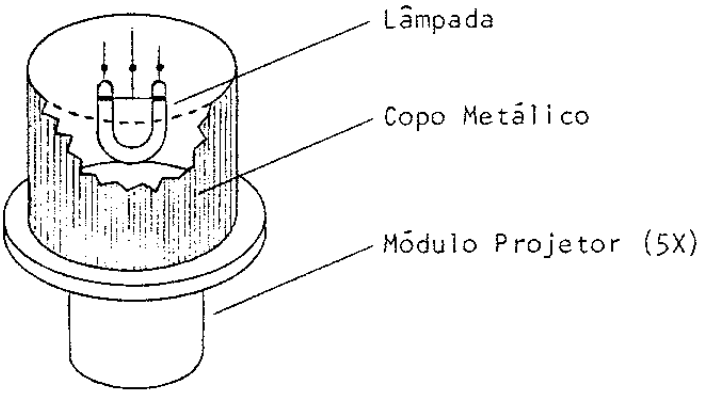


Fig. 3.10 - Lâmpada encerrada em um copo metálico acoplado diretamente ao módulo projetor.

Nessas condições, dado o baixo aproveitamento da luz gerada no disparo, pela má qualidade do copo metálico como refletor, o filme só foi sensibilizado satisfatoriamente com cinco disparos sucessivos da lâmpada sobre a mesma imagem. Aceitou-se como satisfatória uma exposição que fornecesse a relação opacidade-transparência acima de 98% medida em um microdensitômetro.

Na tentativa de sensibilizar o filme com apenas um disparo, foram feitos vários arranjos utilizando lentes e refletores para aumentar a densidade luminosa sobre o objeto. Verificamos, entretanto, que apesar de eliminarmos o cabo de fibras ópticas e utilizarmos apenas uma lâmpada, a fonte de luz se tornara um objeto pesado e volumoso, impróprio para ser colocado sobre o carro do coordenatógrafo.

Outro fator que nos levou à colocação da fonte de luz fora do coordenatógrafo foi o aquecimento da lâmpada, prejudicial ao filme objeto do módulo projetor.

Para compensar as perdas introduzidas com a utilização do cabo de fibras ópticas, um maior aproveitamento da luz gerada devia ser atingido. As dificuldades de realização mecânica nos desencorajaram de optar por refletores parabólicos ou elípticos e nos levaram a tentar a utilização de um refletor não convencional, formado por um condensador cônico e um espelho esférico cujas características e detalhes de construção estão relatadas no ítem 3.4.

3.4 - Condensadores Cônicos

A utilização de um tubo cônico como elemento concentrador de luz foi primeiramente analisada por Williamson (ref.6).

A capacidade de coletar luz de um tubo cônico depende da relação entre os diâmetros das suas aberturas.

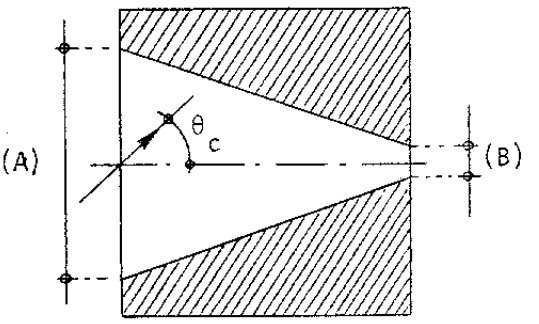


Fig. 3.11 - Cavidade cônica utilizada como elemento concentrador de luz.

Qualquer raio que incida no cone pela abertura maior (A) com um ângulo menor que um dado ângulo crítico θ_c definido pela relação 3.12, emergirá pela abertura menor (B), sendo

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \frac{B}{A} \qquad (3.12)$$

As perdas por reflexão podem ser estimadas em função do número de reflexões que sofre um raio ao atravessar o cone.

O número de reflexões e o ângulo de emergência para cada raio incidente podem ser determinados com base na construção geométrica mostrada na figura 3.12.

O ângulo de emergência em (B) e em (A), é:

$$b = 180 - (a + n.\theta);\ \theta > \theta_c \quad \text{e} \quad b = a+(n-1)\theta\ ;\ \theta < \theta_c \qquad (3.13)$$

O número de reflexões é o próximo inteiro maior que n, sendo

$$n = \frac{360 - \theta - \zeta}{2.\theta} \qquad (3.14)$$

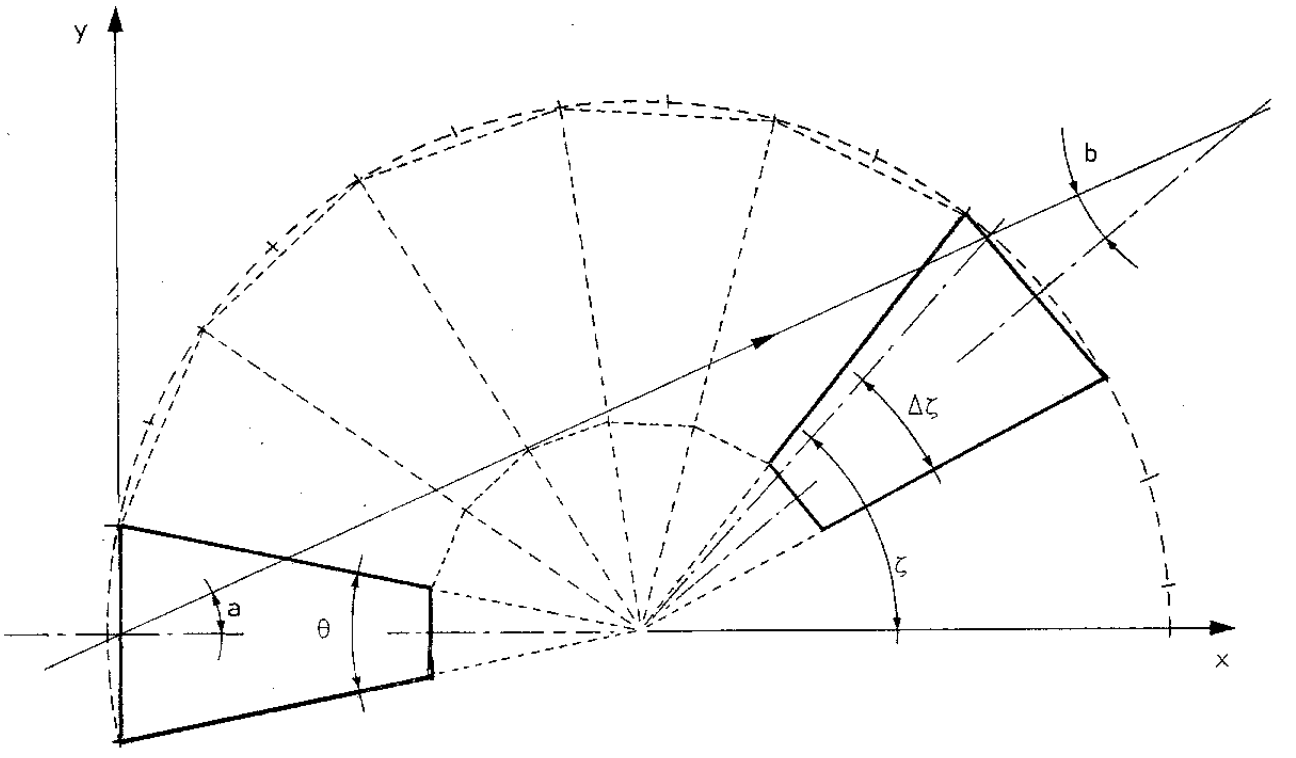


Fig. 3.12 – Construção geométrica que permite determinar o número de reflexões (n) e o ângulo de emergência (b) de um raio incidente.

Keck, Redmann, White e Dekinder (ref.7) utilizaram um condensador cônico para concentrar a luz do sol coletada por um espelho parabólico em um bastão de laser, obtendo alta eficiência.

Entretanto, maior atenção para a análise dos condensadores cônicos tem sido dada em trabalhos referentes às fibras ópticas.

Kapany (ref.8) utilizou um cabo de fibras cônicas para aumentar a velocidade fotográfica, devido às suas propriedades de concentração de fluxo luminoso, em um sistema corretor de distorção e curvatura de campo para lentes (FOCON).

No puxamento de fibras de vidro podem ocorrer grandes variações no diâmetro da fibra puxada. Constrições de até 75% do diâmetro têm sido observadas e nas regiões de estrangulamento a fibra se comporta essencialmente como um refletor cônico. Desse modo todo raio que incida nessa região com inclinação maior que o ângulo crítico de incidência, é refletido de volta. Esta contribuição é muito significativa nas perdas da fibra (ref.9).

3.5 - Construção do Condensador Cônico

O cone que utilizamos foi construído em alumínio, tendo a sua estrutura dividida em três setores ao longo do eixo; figura 3.13.

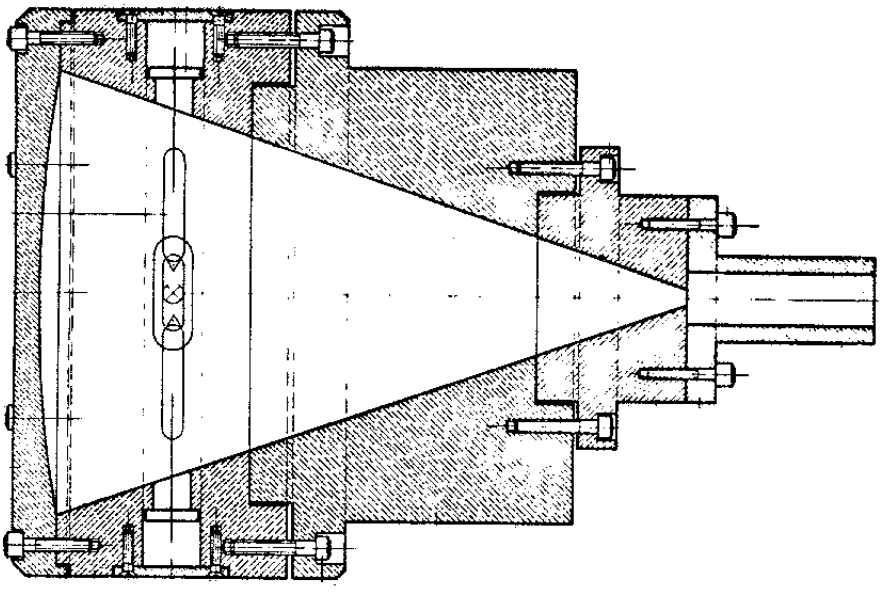


Fig. 3.13 - Cavidade cônica - corte longitudinal

Essa divisão foi necessária devido à limitação na penetração da ferramenta do torno na cavidade cônica.

No primeiro setor foram feitas quatro cavidades laterais para suportarem quatro lâmpadas colocadas de modo radial tal como mostra a figura 3.14.

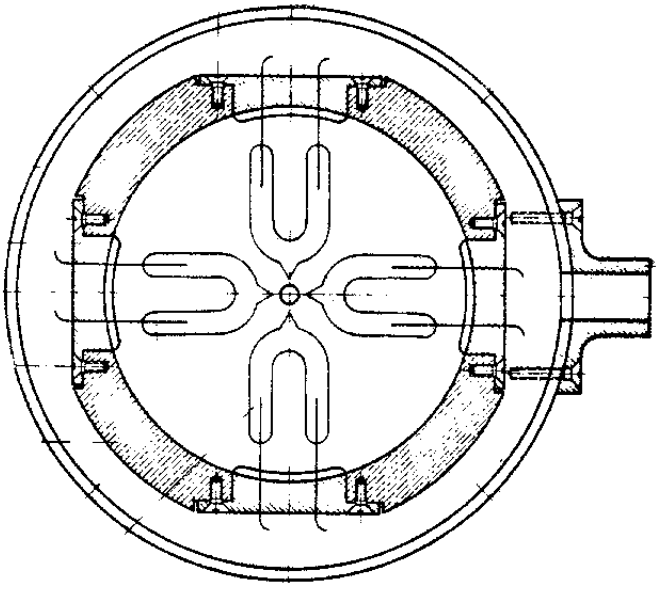


Fig. 3.14 - Abertura maior - disposição da lâmpada.

A abertura maior foi, portanto, dimensionada com base na disposição das lâmpadas, no caso 118mm de diâmetro.

O terceiro setor teve sua abertura menor dimensionada para ser acoplada a um cabo de fibras ópticas de no máximo 4mm de diâmetro, tendo, portanto, 4mm.

O setor intermediário acopla os extremos somente.

De acordo com a equação 3.12 o ângulo crítico de incidência no cone é função apenas das dimensões de (A) e (B), assim arbitramos para o comprimento 165,5mm e consequentemente a sua abertura angular é de 38°; figura 3.15.

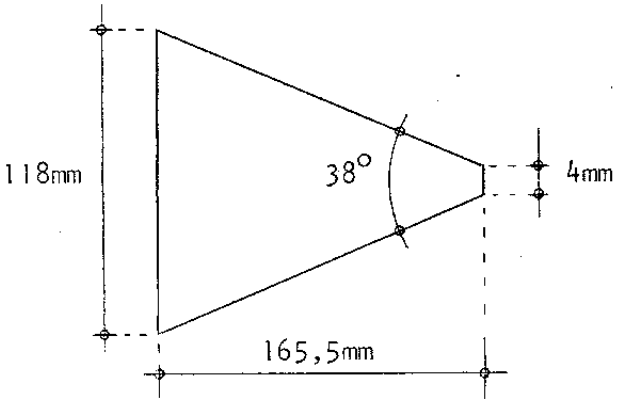


Fig. 3.15 – Esquema mostrando as dimensões características do cone.

O espelho esférico que fecha o cone na abertura maior foi também construído em alumínio e polido. Seu raio de curvatura mede 346mm o que corresponde a uma distância focal de 173mm, proporcionando maior intensidade luminosa sobre o objeto.

A função do espelho, no caso, é refletir de volta os raios rejeitados pelo cone (incidência acima do ângulo crítico) e a luz gerada na região de traz das lâmpadas.

O ganho do sistema espelho+cone, como refletor, foi medido do seguinte modo:

Levantamos a curva de transferência de um fotodiodo, variando a distância de uma lâmpada incandescente, do tipo usado em lanternas, ao fotodiodo. O experimento foi feito segundo o esquema da figura 3.16.

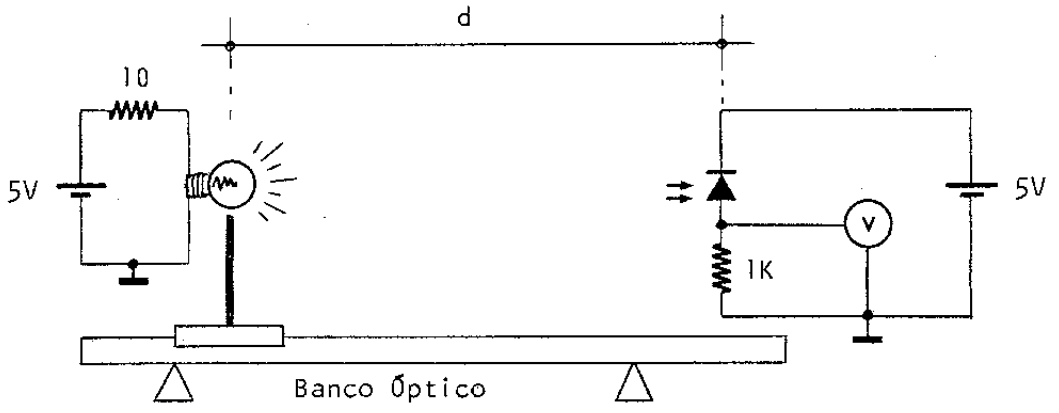


Fig. 3.16 - Montagem utilizada na calibração do fotodiodo.

Na figura 3.17 mostramos a curva que relaciona a tensão medida em (V) com a distância d. A tensão em (V) exprime, indiretamente, a intensidade luminosa no diodo.

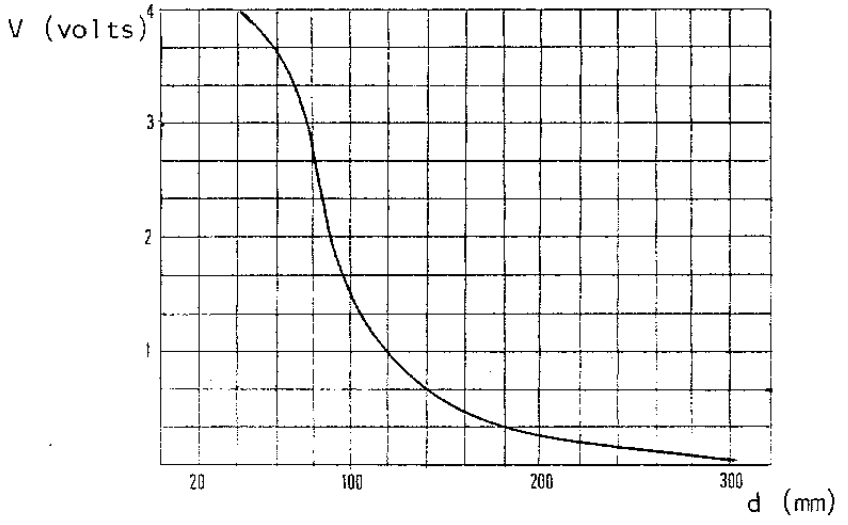


Fig. 3.17 - Curva característica do fotodiodo utilizado.

Após a caracterização do fotodiodo, a lâmpada foi colocada no plano das lâmpadas de Xenônio, dentro do cone fechado e o fotodiodo na abertura menor do cone.

Nessas condições a distância da lâmpada ao fotodiodo é 140mm e a

tensão V medida: 3,1 volts, ou seja, 4,4 vezes maior que a tensão medida com a lâmpada em aberto (0,7 volts) à mesma distância do fotodiodo.

Sem o espelho esférico, o ganho do condensador cônico foi 2,8 vezes; figura 3.18.

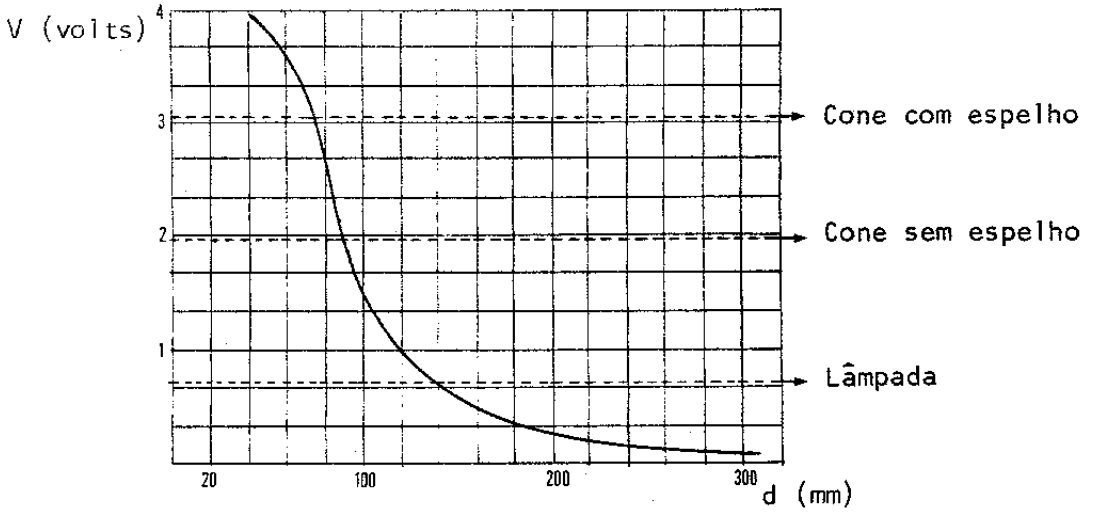


Fig. 3.18 - Determinação do ganho proporcionado pelo condensador óptico.

Outras compensações às perdas por acoplamento foram a utilização dos módulos projetores com fator de ampliação máximo 2,5 vezes (comentado no Capítulo 1) e o uso de um filme mais sensível (12 ASA).

3.6 - Teste da Fonte de Luz

Para testar o desempenho da fonte de luz utilizamos um cabo de fibras ópticas "LEITZ" de diâmetro 2mm pertinente ao iluminador do microscópio modelo 520-39R acoplado à fonte a um módulo projetor com fator de ampliação 2,5X. Para o registro das imagens projetadas utilizamos o filme Kodalith-Ortho 3 (12 ASA).

No processamento fotográfico, tivemos as condições:

Revelador: D-11
Tempo de revelação: 3 minutos
Temperatura dos banhos $\simeq 20^{o}C$
Tempo de fixação > 4 minutos

Nessas condições a região escura apresentou (em teste densitométri

co) uma porcentagem de opacidade de 100%.

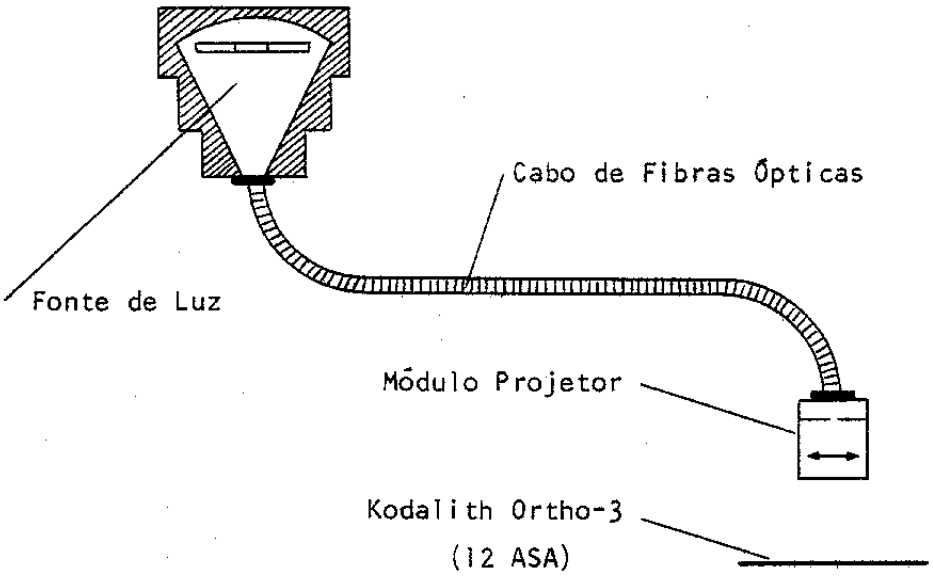


Fig. 3.19 - Montagem utilizada no teste de caracterização da imagem sobre o fotolito.

Com relação ao aquecimento da fonte de luz, observamos que com as quatro lâmpadas operando na máxima frequência permitida (15 Hz) durante duas horas seguidas, a temperatura interna da fonte estabilizou em 78°C, sem qualquer perigo, portanto, para as lâmpadas ou para o cabo de fibras ópticas.

Observações

Embora tenhamos determinado a indutância do circuito de descarga através das medidas dos tempos de duração dos pulsos luminosos, método este descrito por Edgerton (ref. 4), acreditamos que uma maneira mais correta é fazê-lo a partir das medidas dos tempos de duração dos pulsos de corrente consequentes das descargas do capacitor. A medida desses pulsos pode ser feita simplesmente com a utilização de um "shunt".

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) - EDGERTON, Harold "Techniques of light measurement". In: _____ - *Electronic flash, Strobe*. N.Y., Wiley, 1970 cap. 11, p. 235-258.

(2) - MARKIEWICZ, EMMETT "Design of flashlamp driving circuits". IEEE - *J. Quantum Electron.*, N.Y., 2(11): 707-712, Nov., 1966.

(3) - GONCZ, John H. "Resistivity of xenon plasma" *Appl. Phys.*, Berlim, 36(3): 742-743, pt. 1, Mar., 1965.

(4) - EDGERTON, Harold "Theory of the electronic flashlamp". In: _____ - *Electronic flash, Strobe* N.Y., Wiley, 1970. cap. 2, p.6-47.

(5) - HOOK, DISHINGTON & HILBERG "Xenon flashlamp triggering for laser applications". *IEEE - Trans. on Electron Devices*, N.Y., 19(3): 308-315, Mar., 1972.

(6) - WILLIAMSON, Donald "Cone channel condenser optics" *J. Opt. Soc. Amer.* Rochester, N.Y., 42(10): 712-715, Oct., 1952.

(7) - HECK, WHITE; DEKINDER; REDMANN "A new condenser for a sun-powered continuous laser". *Appl. Opt.*, N.Y., 2(8):, Aug., 1963.

(8) - KAPANY, N.S. "Fiber optics VIII, the focon". *J. Opt. Soc. Amer.* Rochester, N.Y., 2(8): 32-34, Aug., 1963.

(9) - _____ "Fiber optics - I; Optical properties of certain dielectric cilinders". *J. Opt. Soc. Amer.*, Rochester, N.Y., 47(5): 413-422, May, 1957.

(10) - NOVOTNY, George "Fiber optics for electronics enginners". *Electronics* N.Y., 35(11): 37-42, June, 1962.

(11) - OLIVER, John & BARNES, Frank "Rare gas flashlamps: the state of the art and unsolved problems". *Proc. IEEE*, N.Y., 7(4): 638-644, Apr., 1971.

(12) - GUSINOW, M.A. "Spectral efficiency of pulsed high-current flashlamp". *J. Appl. Phys.*, Menasha, Wisc., 46(11): 4847-4851, Nov., 1975.

(13) - HOLZRICHTER & EMMETT "Design and analysis of a high brightness axial flashlamps". *Appl. Opt.*, N.Y., 8(7): 1459-1465, July, 1969.

(14) - GONCZ & MEWELL "Spectra of pulsed and continous Xenon discharges" *J. Opt. Soc. Amer.*, Rochester, N.Y., 56(1), Jan., 1966.

(15) - HARPER & GUNDERSEN "Construction of a high power Xenon ion laser". *Rev. Sci. Instr.*, Rochester, N.Y., 45(3): 400-402, Mar., 1974.

(16) - MURPHY, & EDGERTON "Electrical characteristics of stroboscopic flashlamps" *J. Appl. Phys.*, Menasha, Wisc., 12(12), Dec., 1941.

(17) - STAW, et alii. "Driving circuits for energy-dependent loads". *J. Appl. Phys.*, Menasha, Wisc., 44(5): 2149-2152, May, 1973.

(18) - GRAHAM, R.W. "A calibrated silicon photo-diode for measuring and triggering pulsed light sources". *J. Photogr. Sci.*, 21(5): 232-238 1973.

CAPITULO 4

Sistema Elétrico de Controle

4.1 - Introdução

Neste capítulo relatamos o projeto do sistema elétrico de controle da fonte de luz (ref's. 2 a 7).

O sistema é atuado pelo controlador dos motores de passo (ref. 1) através dos terminais relógio, ativador e zero dos contadores. Por sua vez o sistema atua sobre o controlador dos motores de passo para indicar a ocorrência de erros; figura 4.1.

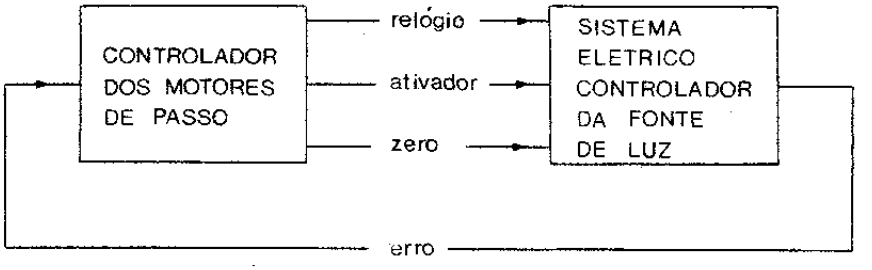


Fig. 4.1 - Interligação do controlador dos motores de passo com a fonte de luz.

Basicamente a função do sistema elétrico de controle é contar um determinado número de pulsos de um relógio, que corresponde à frequência de excitação dos motores de passo, e provocar o disparo das lâmpadas da fonte de luz se o nível lógico no terminal ativador for alto. A inicialização de conta-

gem pode ser feita pelo controlador dos motores de passo através do zero dos contadores.

Caso uma das lâmpadas da fonte de luz não responda à excitação, um pulso de erro detectado é enviado ao controlador. A ocorrência de nove falhas seguidas de uma lâmpada, o sistema inibe as entradas e indica a lâmpada inoperante.

Todo o sistema pode ser esquematizado, em blocos, como mostra a figura 4.2.

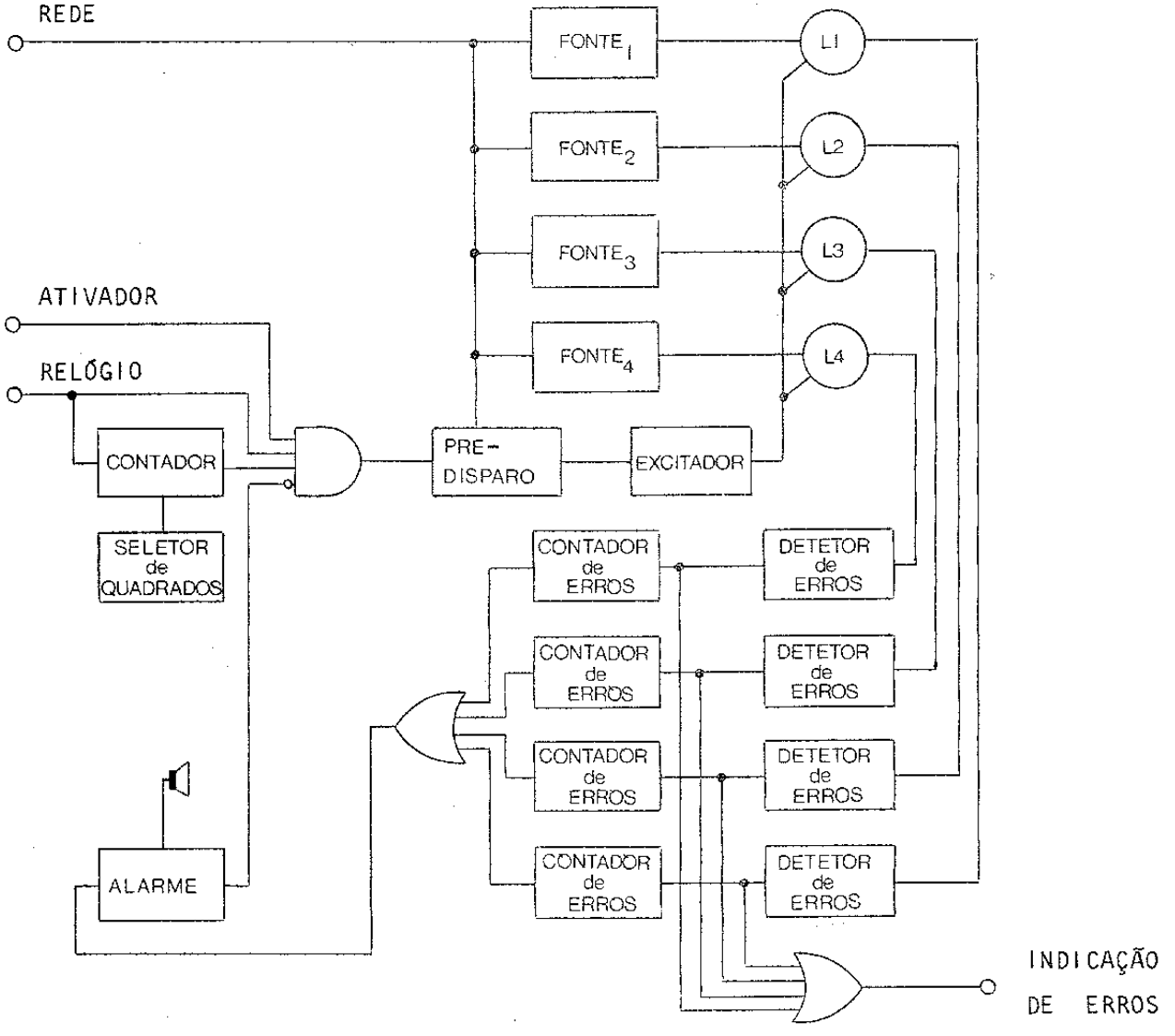


Fig. 4.2 - Diagrama em blocos do sistema de sensibilização de fotolitos para a geração de fotomáscaras.

No decorrer do texto, cada bloco que constitue o esquema será descrito em detalhes.

4.2 - Atuação do Sistema de Controle

As lâmpadas de descarga gasosa que constituem a fonte de luz devem ser disparadas periodicamente ao longo do plano varrido pelo módulo projetor, que é conduzido por três motores de passo tal como mostra a figura 4.3.

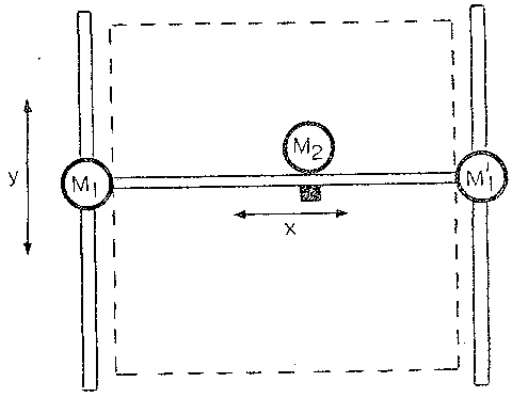


Fig. 4.3 - O módulo projetor varre toda a mesa do coordenatógrafo conduzido por três motores de passo.

Os motores M_1 e M'_1 são sincronizados e deslocam todo o braço x na direção y. O motor M_2, por sua vez, desloca o módulo da direção x.

Os motores utilizados (Phillips - PDI2) são dotados de uma caixa de engrenagens de redução e permitem um deslocamento linear de 10 µm por passo sendo excitados por um trem de pulsos positivos, cada pulso correspondendo ao avanço de um passo.

Para que se desloque um dos motores de um intervalo L (mm), devemos excitá-lo com um trem de 100L pulsos.

Durante a geração de um segmento, um dos motores conduz o módulo projetor ao longo de uma reta sobre a qual devem ser projetados quadrados lado a lado; figura 4.4.

Isso significa que, a cada deslocamento correspondente ao lado do quadrado projetado, as lâmpadas devem ser disparadas. Assim, para a projeção de quadrados de 2mm de lado, a cada 200 pulsos de comando dos motores, um pul-

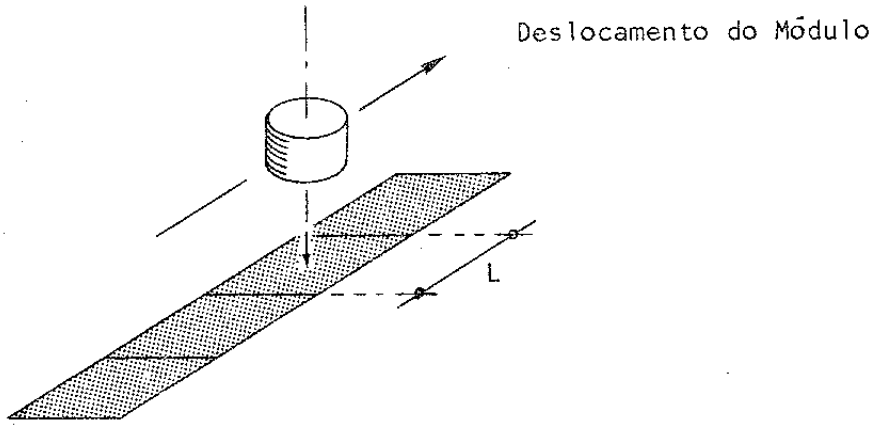


Fig. 4.4 - Sequência de quadrados gerando um segmento.

so deve ser enviado para a excitação das lâmpadas. Esta função é desempenhada pelo bloco "contador" cuja configuração interna está na figura 4.5.

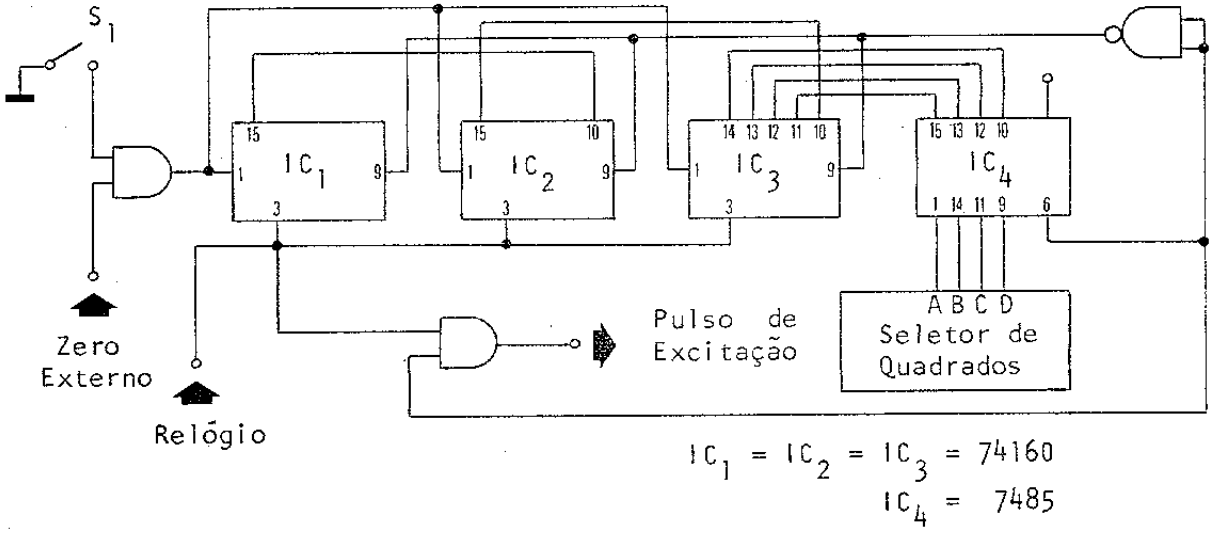


Fig. 4.5 - Detalhes do bloco contador.

Os CI's IC_1, IC_2 e IC_3 são décadas contadoras que, na configuração apresentada, permitem a contagem de centenas de pulsos do relógio. De acordo com a palavra de comparação imposta ao comparador de quatro bits (IC_4) teremos então a detecção do número de pulsos desejados; no caso: 100, 200, 300, 400 e 500 correspondentes à projeção de quadrados com 1, 2, 3, 4 e 5mm respectivamente.

As décadas podem ser zeradas por meio de um pulso vindo do sistema que comanda os motores de passo (zero externo), que ocorre todas as vezes que

se inicia uma linha de varredura. Outra maneira de zerar as décadas é por meio de um pulso gerado em tecla (S_1) pertinente ao próprio sistema (zero manual).

A seleção do quadrado a ser projetado é feita através de teclas que, quando pressionadas, impõem, através de um codificador, a palavra binária (ABCD) de comparação no comparador lógico IC_4. As teclas estão indicadas na figura 4.6 pelas chaves S_2, S_3, S_4, S_5 e S_6.

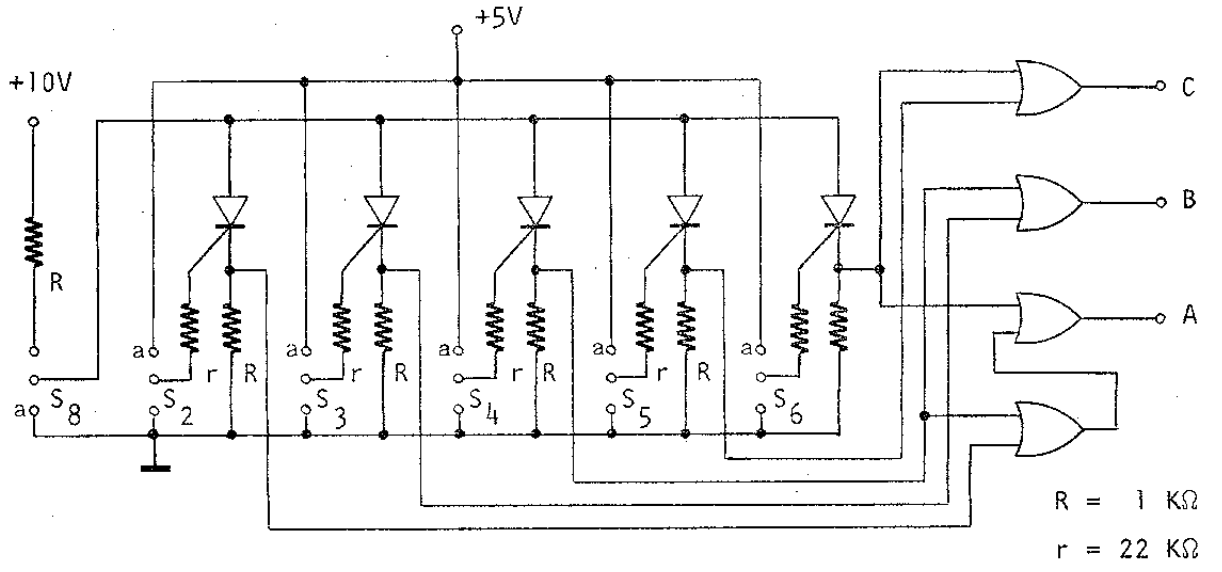


Fig. 4.6 – Detalhes do Seletor de Quadrados.

Quando uma das chaves S_2, S_3, S_4, S_5 ou S_6 é acionada, o SCR correspondente é gatilhado e passa a conduzir, fazendo com que o potencial em seu catodo passe ao nível lógico alto. Qualquer SCR do conjunto é cortado ao pressionarmos a tecla S_8 cuja função é levar o potencial dos anodos dos SRCs à terra, quando isso acontece os potenciais nos catodos estão no nível lógico "zero".

Como as teclas estão associadas às funções:

S_8 - zera indicador de quadrados
S_2 - quadrado projetado: 1mm
S_3 - quadrado projetado: 2mm
S_4 - quadrado projetado: 3mm
S_5 - quadrado projetado: 4mm
S_6 - quadrado projetado: 5mm

então a palavra binária de comparação obedece à relação:

$$A = S_2 + S_4 + S_6$$

$$B = S_3 + S_4$$

$$C = S_5 + S_6$$

O bit D está ligado ao nível "zero" já que o número máximo de passos a ser contado é 500 (0101) ≡ (DCBA).

O pulso gerado na saída do comparador ao detectar um certo número de pulsos impostos pelas teclas seletoras só irá, efetivamente, provocar o disparo das lâmpadas se a condição de disparo estiver acionada. Esta condição é imposta pelo programa de desenho da configuração da arte final em geração.

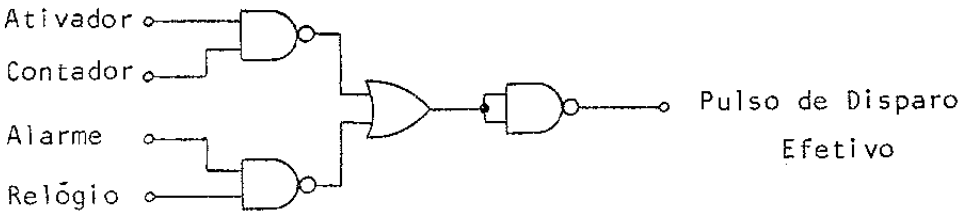


Fig. 4.7 - Obtenção do pulso de disparo efetivo (lógica).

Assim, como se pode ver na figura 4.7 o pulso vindo do comparador (entrada "contador") só determina um disparo quando as outras entradas "alarme" (o sistema não apresenta irregularidades) e "ativador" (imposta pelo sistema que determina a configuração da arte) estiverem no nível lógico alto. A saída do comparador está sincronizada ao "relógio" para evitar disparos aleatórios.

Analisemos a situação em que há condição de disparo: devido à estrutura do circuito que fornece energia para o disparo das lâmpadas, que é analisado mais adiante, estas só devem ser disparadas nos instantes em que o potencial da rede é negativo em relação ao terra do sistema (justificaremos este fato quando analisarmos esse circuito).

Desse modo, se um pulso para disparo for gerado no instante em que o potencial da rede estiver positivo, o sistema deve retardar o efeito desse pulso até o instante em que o potencial da rede se torne negativo (ou simplesmente cruze o zero).

O diagrama de tempo mostrado na figura 4.9 corresponde ao circuito que desempenha este papel de "pré-disparo" que se vê na figura 4.8.

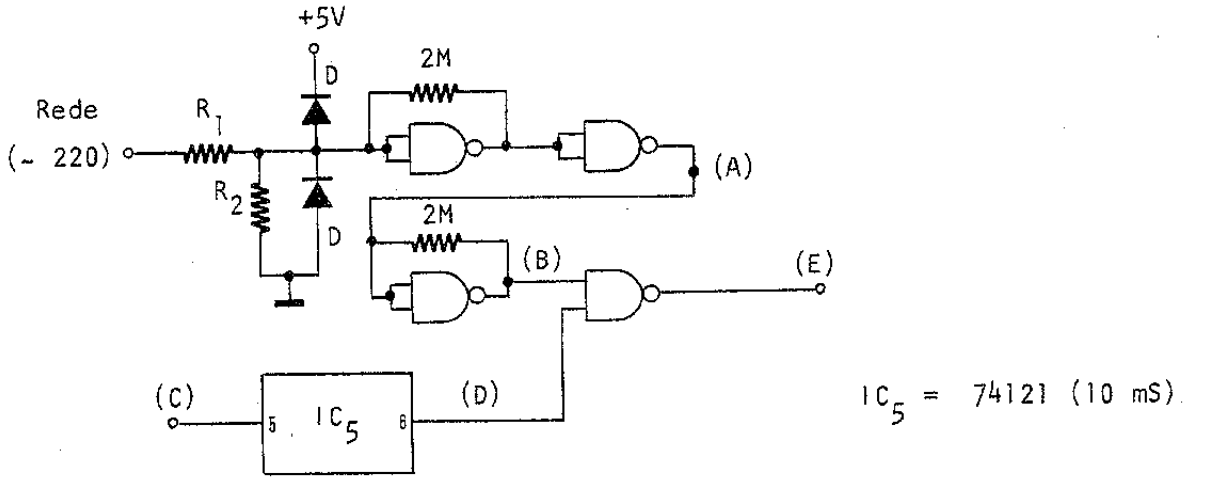


Fig. 4.8 - Detalhes do bloco pré-disparo.

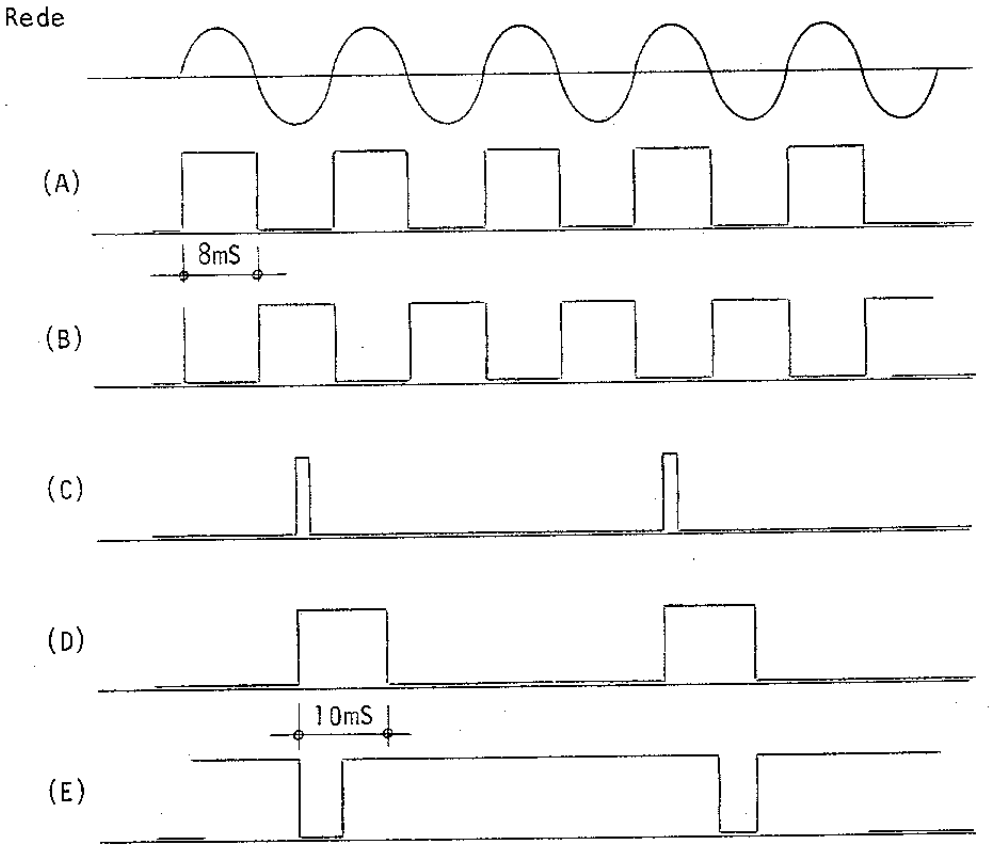


Fig. 4.9 - Diagrama de tempo correspondente ao circuito de pré-disparo.

O divisor de tensão formado pelos resistores R_1 e R_2 atenua o sinal da rede que, em seguida, é limitado aos extremos de 5V a terra pelos diodos (D). As três portas "NAND", com entradas coincidentes cada uma, funcionam como inversores cuja função é "quadrar" e inverter o sinal atenuado da rede (onda B).

O pulso gerado na saída do comparador (efetivo de disparo) (onda C) excita um monoestável (IC_5) na transição de subida fazendo-o gerar um pulso de duração igual a 10 mS (onda D) que é comparado ao sinal da rede (B) através de uma porta "NAND", fornecendo assim a (onda E).

As lâmpadas são disparadas na transição de descida da onda E. Pode-se ver nesse diagrama que, no caso do primeiro pulso gerado em C, a lâmpada foi disparada sem retardo, já que o potencial da rede se encontrava em condição satisfatória. No segundo pulso, entretanto, houve um retardo na transição de descida do sinal E pois o potencial da rede estava positivo.

O retardo introduzido no disparo das lâmpadas gera um erro no posicionamento do quadrado projetado nesse instante, provocando o aparecimento de falhas no segmento gerado tal como mostra a figura 4.10.

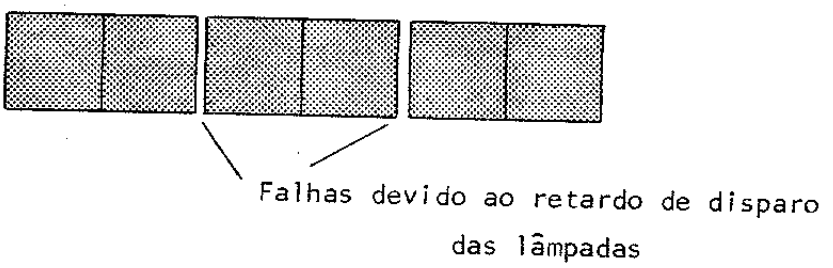


Fig. 4.10 - Possíveis falhas em um segmento.

A largura máxima dessas falhas, correspondente a um retardo de 8mS (meio período da rede), depende da velocidade de deslocamento do módulo projetor que obedece à relação mostrada na tabela 1 para cada dimensão de quadrado projetado.

Esse erro máximo introduzido (falha de 200 μm) em um segmento na arte final é eliminado nas etapas de fotorredução (padronizadas como 250X) pois ultrapassa a resolução das objetivas utilizadas (150 linhas/mm na redução de 10X).

Quadrado Projetado (Lado em mm)	Velocidade do Motor (mm/seg)	Largura Máxima das Falhas (μm)
1	15	120
2	25	200
3	25	200
4	25	200
5	25	200

Tabela 1 - Na geração de um segmento pode ocorrer uma falha máxima de 200 μm.

A forte luminosidade produzida pelas lâmpadas de descarga gasosa de Xenônio ao serem disparadas é conseguida através da descarga de um capacitor ligado em paralelo com a lâmpada.

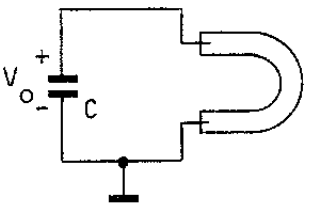


Fig. 4.11 - Gás não ionizado: circuito aberto.

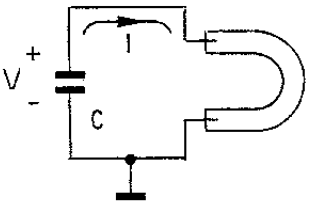


Fig. 4.12 - Gás ionizado: disparo.

Numa situação estática a lâmpada se comporta como um circuito aberto para o capacitor carregado, devido à alta resistência apresentada pelo gás não ionizado nela contido; figura 4.11.

Se de algum modo, entretanto, o gás se tornar ionizado, a baixa resistividade apresentada nesta condição (ref.2), praticamente curto-circuitará o capacitor que assim se descarregará produzindo-se então uma intensa luminosidade na lâmpada (3); figura 4.12.

A energia fornecida à lâmpada pelo capacitor, no disparo, é dada pela relação

$$e = \frac{1}{2} CV^2$$

como já visto no Capítulo 3.

A luminosidade produzida é proporcional à energia fornecida à lâmpada pelo capacitor e à eficiência luminosa da lâmpada.

Maiores detalhes sobre a lâmpada utilizada assim como o número de lâmpadas utilizadas na fonte de luz são dados no Capítulo 3.

No sistema apresentado são usadas quatro lâmpadas, que trabalham em regime simultâneo, às quais correspondem quatro capacitores como fontes de energia; figura 4.13.

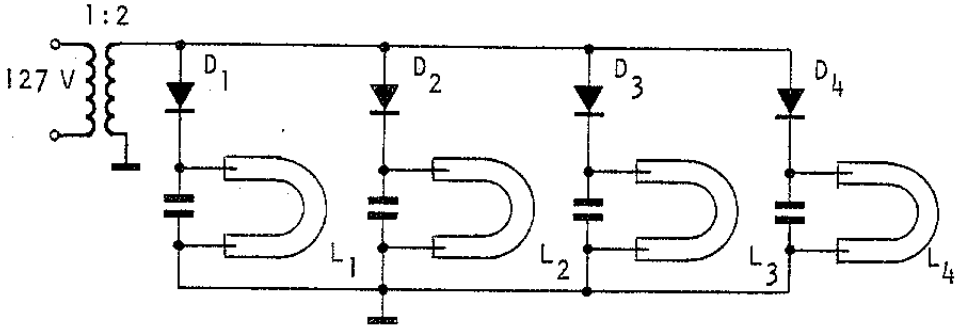


Fig. 4.13 - Circuito de alimentação das lâmpadas.

Cada capacitor C_1, C_2, C_3 ou C_4 indicado na figura 4.13 corresponde a um conjunto de 10 capacitores de poliester metalizado com características nominais (1 μF/630V) ligados em paralelo.

Optou-se por este tipo de capacitores devido às suas características de auto-regeneração, estabilidade e baixa fuga.

Convém ressaltar que vários testes preliminares foram feitos utilizando-se capacitores eletrolíticos. Observou-se uma grande não-uniformidade no desempenho das lâmpadas (através da medida de intensidade luminosa produzida) em regime de frequências de operação acima de 5 Hz. Outro problema observado foi o frequente rompimento do dielétrico nos capacitores eletrolíticos em regime de frequências acima de 5 Hz.

Vemos na figura 4.13 que cada capacitor está ligado a um diodo retificador que por sua vez está ligado ao secundário do transformador. Não há nenhum resistor limitando a corrente que passa pelo diodo para carregar o capacitor; se houvesse, a eficiência de carga de cada capacitor seria menor em consequência da perda por dissipação no resistor. É por esse motivo que foi imposta a condição de que as lâmpadas só devem ser disparadas no instante em que o potencial da rede está negativo em relação à terra.

Sem um resistor para limitação de corrente, caso a lâmpada fosse disparada com o potencial da rede positivo, teríamos, fluindo através da lâmpada não só a corrente de descarga do capacitor, mas também uma corrente adicional devido à rede que estaria limitada apenas pelas resistência (direta) do diodo e do próprio gás, que são muito pequenas; figura 4.14.

A condição para que a lâmpada se apague é que a corrente, por ela fluindo, diminua até um ponto abaixo da chamada corrente de manutenção do plasma (ref.3), durante um determinado tempo mínimo, que também é função da energia envolvida no disparo. O incoveniente, então, de dispararmos a lâmpada com o potencial da rede positivo é que esta correte adicional pode ser maior que a mínima de manutenção do plasma e, em consequência disso, a lâmpada não apagar no tempo esperado.

Além disso, corre-se o perigo de curto-circuitar a própria rede, queimar o diodo, a lâmpada, etc.

Disparando a lâmpada quando o potencial da rede é negativo, garantimos que irá fluir apenas a corrente de descarga do capacitor pois nessa condição o diodo de carga está cortado; figura 4.15.

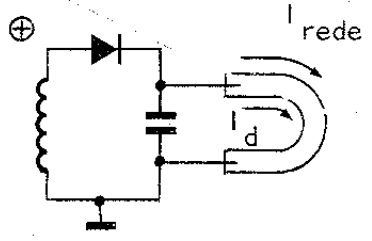


Fig. 4.14 - Disparo com o potencial da rede positivo.

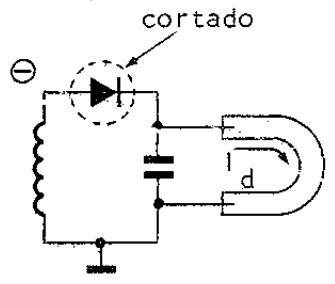


Fig. 4.15 - Disparo com o potencial da rede negativo.

Uma outra vantagem que esse modo de operação apresenta se refere à carga do capacitor.

Caso houvesse um resistor limitando a corrente de carga do capacitor, o ciclo de operação carga/descarga estaria não só limitado pela frequência da rede como também pelo resistor; sem este, o ciclo de operação está limitado apenas pela frequência da rede.

O capacitor se carrega, através da rede, sempre a partir do instante em que o potencial da rede cruza o zero. A carga é, portanto, gradativa e acompanha a tensão da rede. A corrente que passa pelo diodo durante a carga é da

ordem de 800 mA. Na figura 4.16 vemos o comportamento do circuito quando se efetua a carga do capacitor após um disparo.

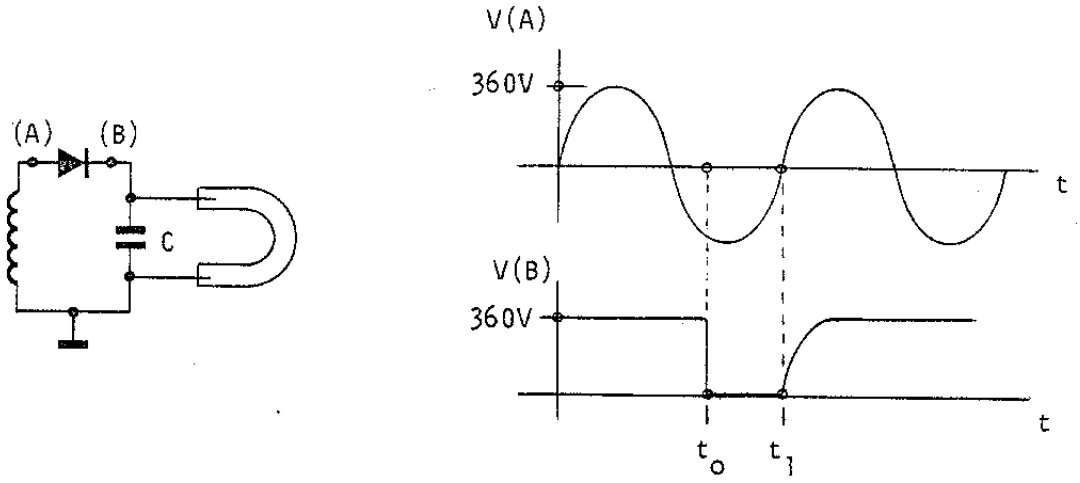


Fig. 4.16 - Carga do capacitor após um disparo.

Assim, no instante t_o, dada a condição favorável do potencial da rede, a lâmpada é disparada e o capacitor descarregado; potencial em (B). A carga subsequente só é iniciada no instante (t_1) quando o potencial da rede cruza o zero.

O potencial em (B) acompanha a forma de onda da rede até atingir a o valor máximo (≃ 360V).

Basicamente existem duas maneiras de se ionizar o gás contido numa lâmpada do tipo usado no sistema; uma, através de um pulso incremental aplicado aos terminais da lâmpada (disparo-série) e outra através de um pulso aplicado nas paredes do vidro da lâmpada (disparo-paralelo). Em ambos os casos, o pulso deve ser de alta tensão (ref.4).

Optamos pelo último dada a maior facilidade de realização.

Em princípio, portanto, para ionizar-se o gás na lâmpada, deve-se gerar um pulso de alta tensão num eletrodo que envolve o tubo de pirex da lâmpada.

Os eletrodos de disparo que trazem as lâmpadas tanto podem ser constituídos em um fio metálico enrolado ou em uma camada de material condutor depositada no vidro, externamente.

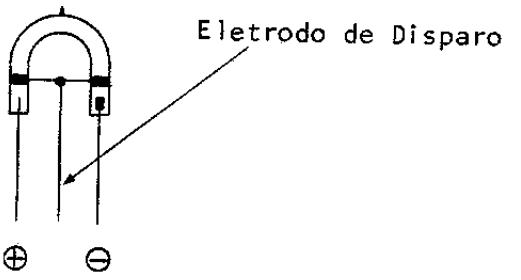


Fig. 4.17 - Lâmpada utilizada.

No sistema em pauta, um pulso de alta tensão (-15 KV) é gerado quando ocorre uma transição de descida no ponto (E) do circuito mostrado na figura 4.8 que corresponde às condições de disparo.

O circuito que realiza tal função é mostrado na figura 4.18.

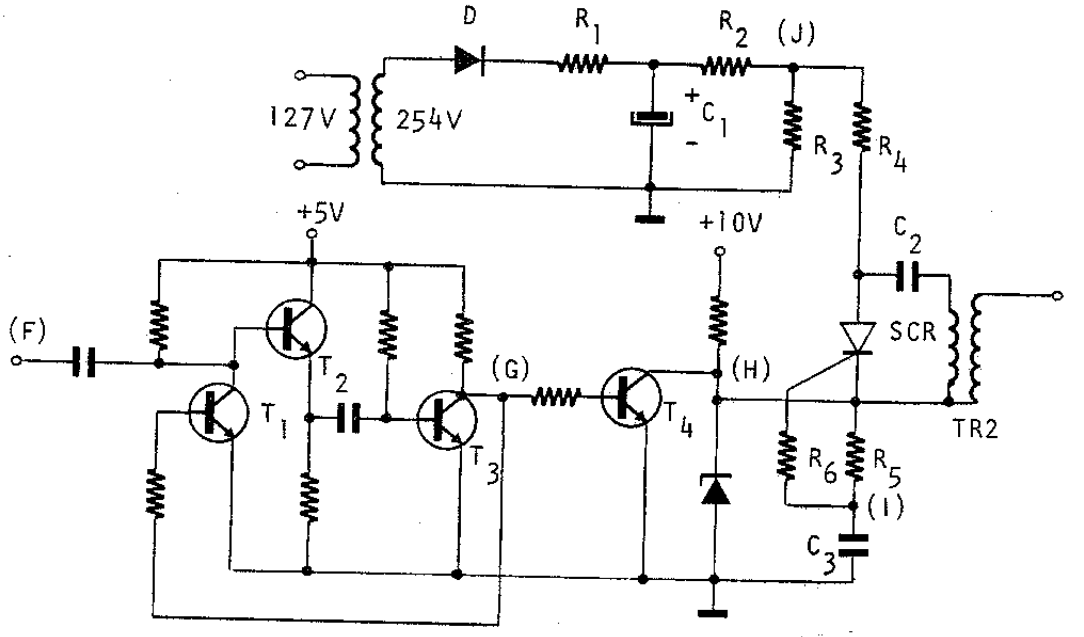


Fig. 4.18 - Detalhes sobre o circuito de disparo.

O capacitor C_1 tem como função manter o potencial constante no ponto (J) cujo valor está determinado pelo divisor de tensão formado pelos resistores R_2 e R_3 em relação ao potencial a que está carregado o capacitor C_1 que é igual à tensão de pico da rede ($\simeq$ 360V). Assim o potencial em (J) vale:

$$V(J) = \left[\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right] . V_{pico}^{rede} \simeq 200V$$

Em regime estacionário, o SCR não está conduzindo e tem, portanto, aplicada aos seus terminais uma ddp de 190V já que o potencial em (H) é 10V.

O fato do potencial em (H) ser 10V se deve a que o transistor T_4 está cortado em virtude da ausência de pulso em (G) que é a saída do monoestável formado pelos transistores T_1, T_2 e T_3.

A utilização de um monoestável discreto se deve à sua maior imunidade a ruídos comparado aos integrados em TTL.

Em regime estacionário, portanto, nenhum pulso de alta tensão é produzido, porque nenhuma variação de tensão ocorre no enrolamento primário do transformador de pulsos (TR2). A tensão aplicada aos terminais de C_2 é a mesma que ao SCR.

Uma transição de descida (5V → 0V) no ponto (F), faz com que em (G) surja um pulso de duração 10 mS devido à constante de tempo do monoestável. Durante esse intervalo o transistor T_4 satura e o potencial em (H) vai praticamente a zero. Na figura 4.19 temos um diagrama de tempo desses potenciais.

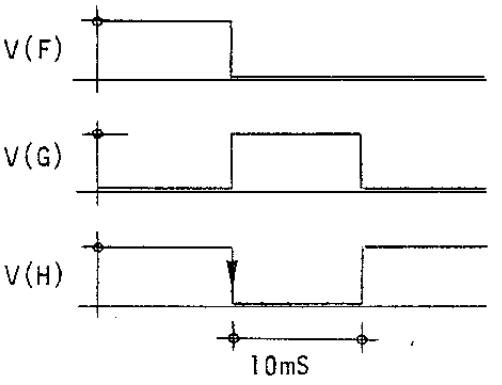


Fig. 4.19 - Pulso de disparo das lâmpadas.

Na transição de descida do potencial em (H) o SCR é gatilhado em consequência do seguinte fato:

Antes da transição, o potencial em (I) é igual ao potencial em (H), pois o capacitor C_3 está carregado; quando, instantaneamente, o potencial em (H), que é o catodo do SCR, vai a zero, o potencial em (I) diminui exponencialmente (descarga de C_3 em R_5); durante esse intervalo de tempo o terminal da porta do SCR torna-se positivo em relação ao catodo; figura 4.20.

Ao conduzir, o SCR produz uma variação de tensão no primário de TR2 e no seu secundário, devido à alta relação de espiras, temos um pulso de alta tensão.

Esse pulso de alta tensão gerado, é aplicado às quatro lâmpadas, simultaneamente, ionizando-as.

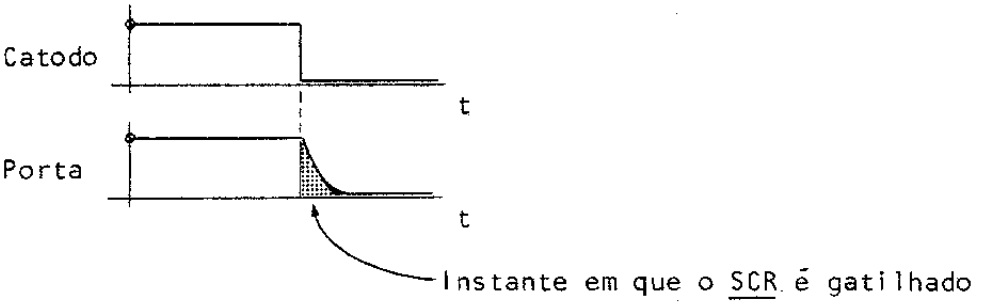


Fig. 4.20 - Disparo do SCR.

O SCR é cortado novamente, em consequência da oscilação surgida na malha formada por C_2 e o enrolamento primário de TR2.

A resposta de cada lâmpada a um pulso de disparo é controlada por um circuito "detetor de erro" cuja função, em princípio, pode ser descrita do seguinte modo:

Um divisor de tensão resistivo formado por R_1 e R_2 no circuito da figura 4.21 reproduz, em modo atenuado, a forma de onda correspondente à descarga do capacitor C na lâmpada, isto significa que todas as vezes que a lâmpada for disparada o potencial em (X) cai, praticamente, a zero.

Esta transição de descida do sinal em (X) é usada para excitar o monoestável (IC_6), através do seguidor de emissor formado pelo transistor T, usado aí como casador de impedâncias, fazendo surgir em (Z) um pulso com largu

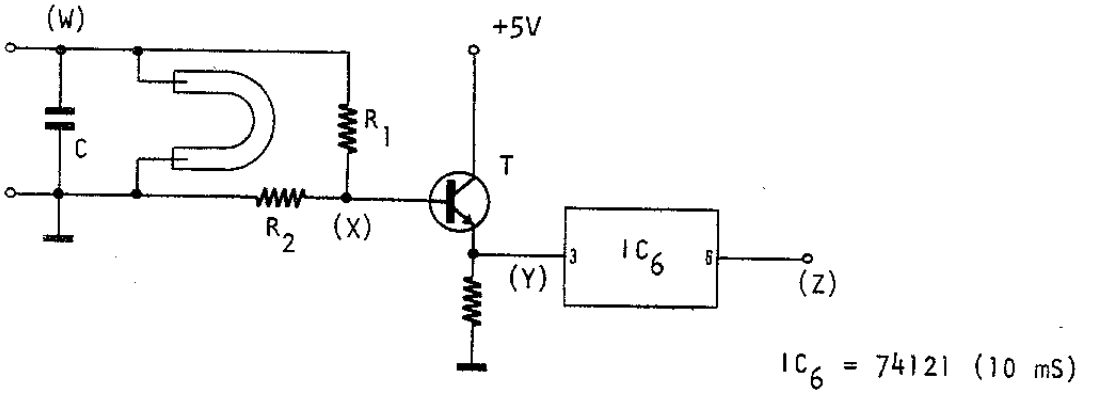


Fig. 4.21 - Detalhes sobre o bloco Detetor de Erros.

ra de 10 mS. Os potenciais em questão estão mostrados no diagrama de tempo da figura 4.22.

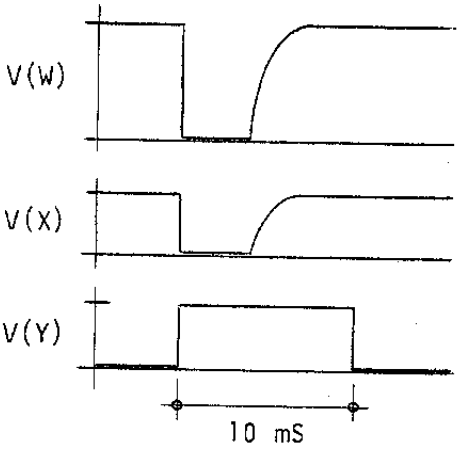


Fig. 4.22 - Diagrama de tempo mostrando o pulso gerado após o disparo da lâmpada.

Este pulso (em Z) gerado é comparado ao pulso que provocou o disparo da lâmpada, verificando assim se a lâmpada respondeu ou não ao pulso de disparo.

Cada vez que a lâmpada não responde ao pulso de disparo é contado um erro que se indica através do mostrador (DPL). Quando, entretanto, a lâmpada responde, o contador é zerado.

Caso uma lâmpada falhe nove vezes seguidas, um sistema de alarme

é acionado, inibindo a entrada do sinal de relógio no sistema. Na figura 4.23 temos o circuito que controla o contador de erros.

No diagrama de tempo mostrado na figura 4.24 vemos o comportamento do circuito.

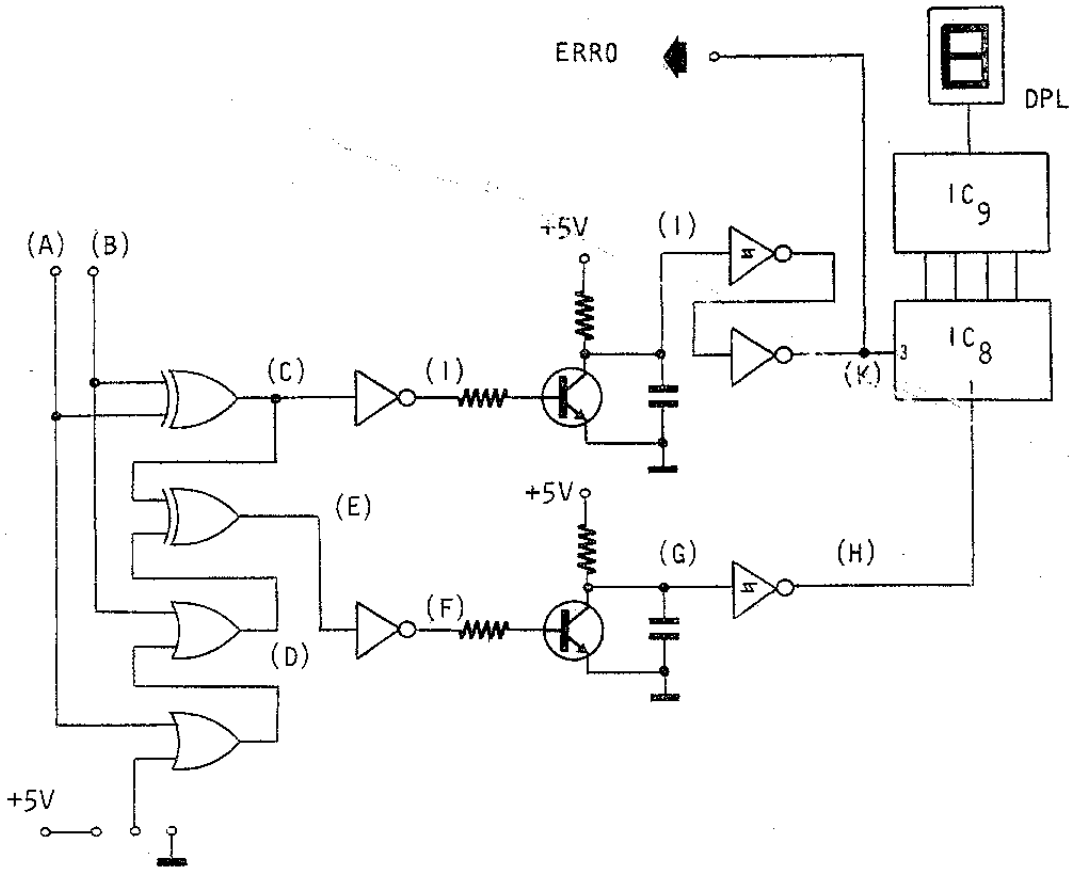


Fig. 4.23 - Detalhes sobre o bloco Contador de Erros.

Os pulsos em (A) são gerados pelo monoestável esquematizado na figura 4.18 e correspondem, nessa figura à forma de onda em (G). Esses pulsos, de duração 10 mS, têm por finalidade disparar as lâmpadas. No instante correspondente à primeira coluna do diagrama da figura 4.24 a lâmpada é disparada , originando o pulso em (B) de duração 10 mS. No diagrama, exageramos o retardo que ocorre entre os pulsos em (A) e (B).

Baseado no diagrama lógico da figura 4.23 pode-se acompanhar o resto dos sinais mostrados no diagrama de tempo.

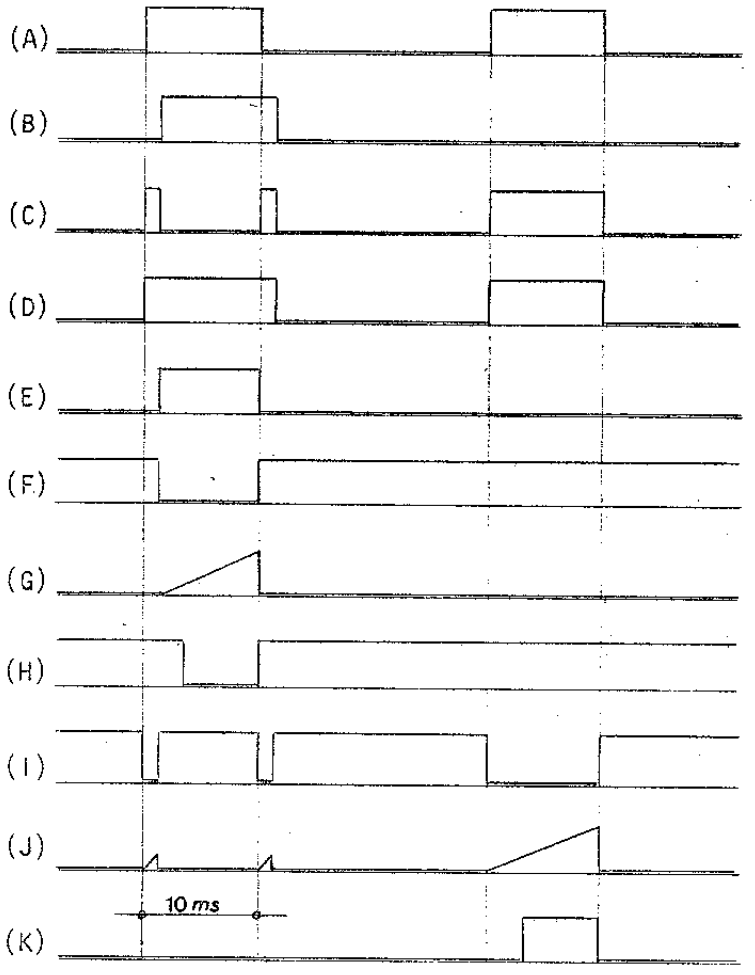


Fig. 4.24 - Diagrama de tempo ressaltando a detecção de erros. As letras correspondem ao circuito da figura 4.23.

Convém ressaltar que, na primeira coluna, devido à lâmpada ter sido disparada, houve uma transição de descida na onda em (H) que corresponde ao "zero" do contador de erros, tal como já citado.

Na segunda coluna, entretanto, não ocorre um pulso em (B), siginificando que a lâmpada não disparou em resposta ao pulso em (A). Em consequên - cia, o nível lógico em (H) permanece alto (zero inibido) e em (K) ocorre um pulso excitando o contador.

Após nove erros seguidos, detetados, ocorre um pulso no terminal "carry" da década contadora.

A finalidade desse pulso é inibir o sistema e acionar um alarme

que indica a falha de uma das lâmpadas. Como a cada lâmpada corresponde um circuito contador, é possível detectar qual lâmpada deve ser trocada.

Na figura 4.25 temos o circuito de alarme.

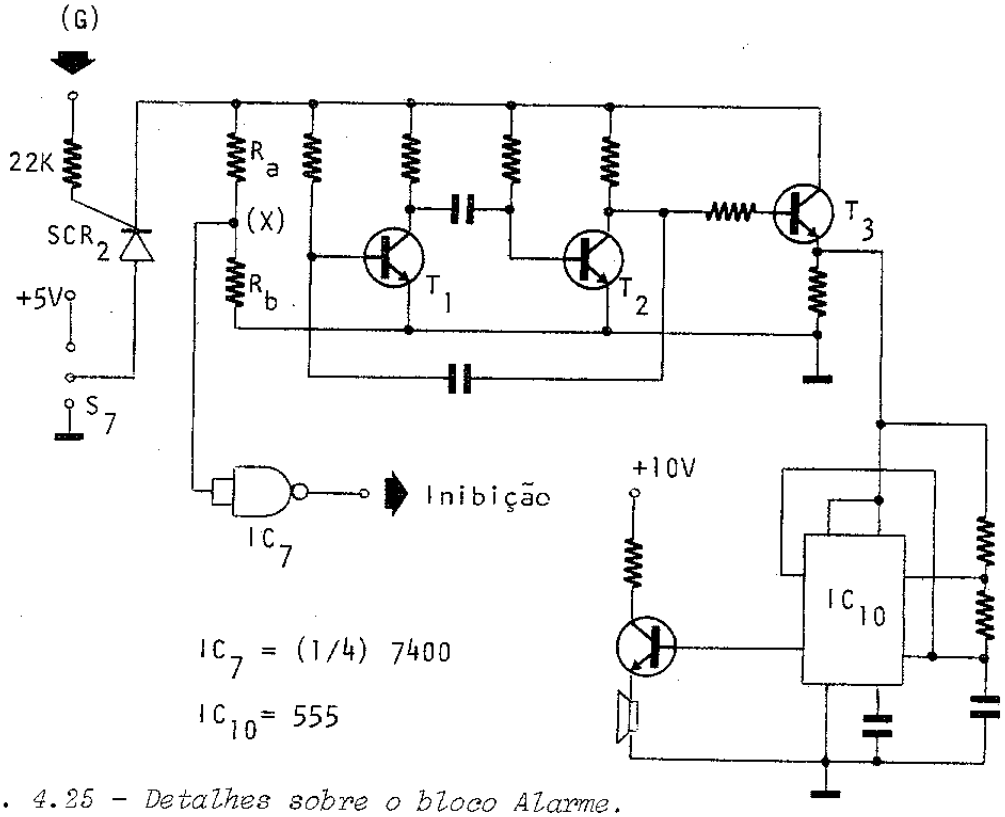


Fig. 4.25 - Detalhes sobre o bloco Alarme.

O pulso gerado no "carry" do contador é aplicado à porta do SCR_2 (terminal - G) através de uma porta OR 4 entradas fazendo-o conduzir. Desse modo o astável formado pelos transistores T_1 e T_2 é alimentado, passando a oscilar em 2Hz (frequência estabelecida na configuração dada).

O transistor de potência T_3, operando em coletor comum, alimenta, por sua vez, um oscilador em 2 KHz formado por um multivibrador astável integrado (555).

O alarme, quando acionado, soa como um "bip-bip" através do alto falante mostrado.

Quando o alarme é acionado o potencial em (X) é elevado e a saída do inversor IC_7 é abaixada, inibindo assim a passagem do "relógio" na entrada do circuito; figura 4.7.

Para indicar qual lâmpada deve ser trocada, o pulso gerado no

"carry" do contador de erros da lâmpada suspeita gatilha um SCR_3, figura 4.26 alimentando um LED que pisca em frequência imposta pelo astável a que está ligado, no caso 2 Hz.

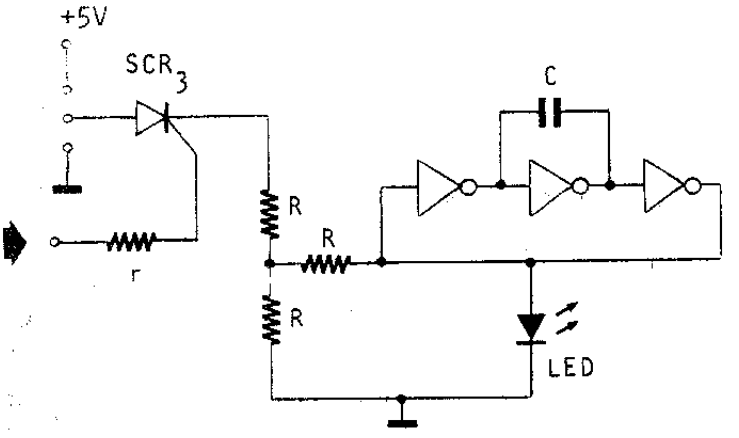
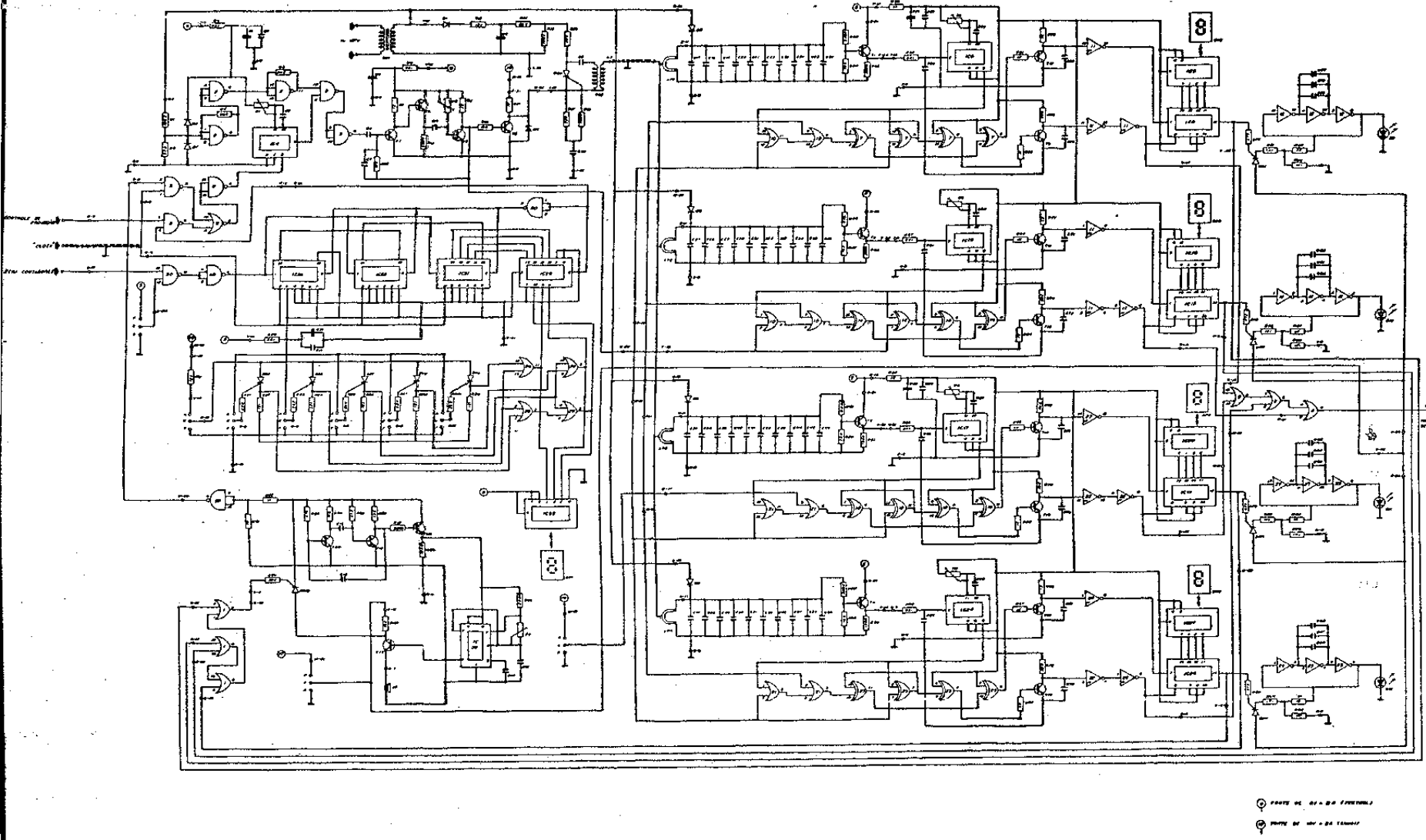


Fig. 4.26 - Indicador da lâmpada inoperante.

Para inibir o alarme e desligar o LED pisca-pisca, basta pressionar a tecla S_7 que, ao levar os anodos dos SCRs 2 e 3, corta-os. Esta técnica já foi usada, anteriormente, no teclado seletor de quadrados.

Para proteger todo o circuito contra ruído induzido pelo pulso de alta tensão que ioniza as lâmpadas, foram usados cabos blindados nos sinais de entrada (relógio, controle de disparo e zero de contadores) e saída (indicador de erros e o próprio pulso de disparo das lâmpadas).



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) - SOUSA, Manoel F. de *Gerador automático de máscaras para confecção de circuitos integrados. I - Sistema de posicionamento digital.* Campinas, Fac. Engª Campinas, 1978. Tese (Mest. Ciênc.) - Fac. Engenharia de Campinas, UNICAMP.

(2) - EDGERTON, Harold "Theory of the electronic flashlamp". In: _____ - *Electronic flash, Strobe.* N.Y., Wiley, 1970. cap. 2, p. 29.

(3) - _____ "Theory of the electronic flashlamp". In: _____ - *Electronic flash, Strobe.* N.Y., Wiley, 1970. cap.2, p. 15.

(4) - HOOK, DISHINGTON & HILBERG "Xenon flashlamp triggering for laser applications" *IEEE - Trans. on Electron Devices*, N.Y., 19(3): 308-315 Mar., 1972.

(5) - MORRIS & MILLER *Designing with TTL integrated circuits.* N.Y., McGraw Hill, 1971.

(6) - STRAUSS, Leonard *Wave generation and shaping.* 2 ed. N.Y., McGraw Hill, 1960.

(7) - OTT, Henry *Noise reduction tecniques in electronic systems.* N.Y., McGraw Hill, 1976.

CAPITULO 5

Resultados Obtidos

Para caracterizar o sistema, foram gerados diversos segmentos de reta em fotolito. O processamento fotográfico desses fotolitos e as condições ambientais foram mantidas em relação aos testes de caracterização da fonte de luz e estão relatadas na página 3.17. Na geração desses segmentos, o motor de passos (deslocamento x) operou em 1 KHz e em nenhum caso observou-se falhas devidas a retardo de disparo.

O desvio máximo, em relação às dimensões de espessuras padronizadas, foi de +1%, correspondente ao módulo projetor de 2mm, medido em um microscópio LEITZ 520-39R.

Para verificar a confiabilidade de disparos da fonte de luz, o terminal em que é indicada a ocorrência de falhas foi ligado a um contador digital e em 200.000 disparos, correspondentes à operação da fonte durante 5 horas seguidas em 10 Hz, não foi registrada nenhuma falha; este procedimento foi repetido quatro vezes, perfazendo 800.000 disparos e o resultado se manteve.

A eficiência do sistema, quanto à detecção de falhas, foi constatada com a colocação de uma lâmpada já vencida na fonte de luz. Em qualquer frequência de operação, as falhas da lâmpada defeituosa, visivelmente notadas, foram registradas pelo sistema e após nove falhas seguidas a entrada do sinal de excitação (relógio) foi inibida soando um alarme para indicar a lâmpada inoperante.

Consideramos satisfatório o desempenho do sistema pelo cumprimento das especificações necessárias ao processo de geração de fotomáscaras para cir

cuitos integrados.

Os circuitos que compõem o sistema eletrônico de controle da fonte de luz foram montados em placas de circuito impresso tamanho padrão e colocados em um bastidor, juntamente com os circuitos de controle dos motores de passo, interface computador-leitora de fita e a própria leitora de fita.

Do bastidor saem os fios que alimentam as lâmpadas da fonte de luz, colocada na sala do coordenatógrafo (sala escura).

Um esquema da montagem final é mostrado na figura 5.1.

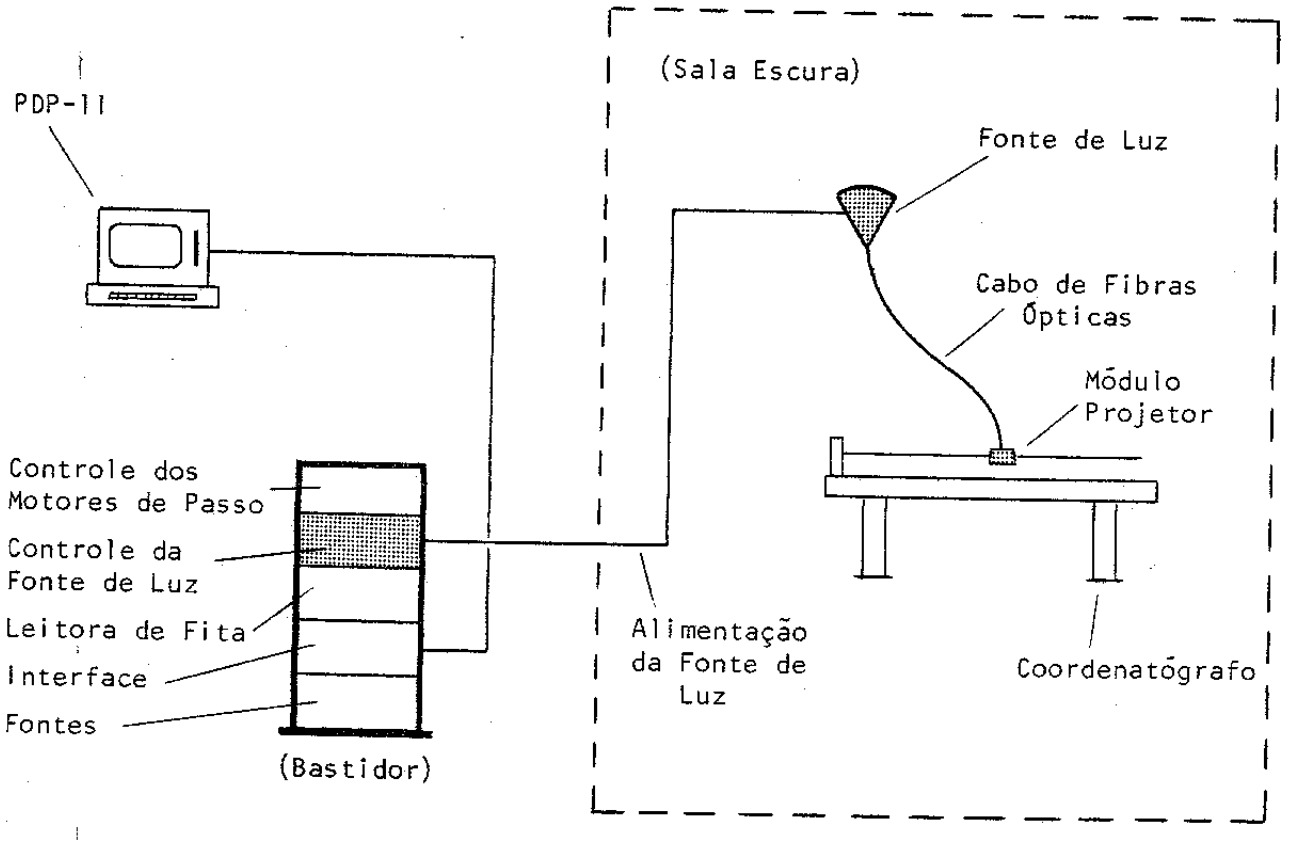


Fig. 5.1 - Montagem do Sistema de geração de Fotomáscaras