1. Publicação nº	2. Versão	3. Data	5. Distribuição
INPE-4361-TDL/301		Setembro 87	☐ Interna ☒ Externa ☐ Restrita

4. Origem	Programa
PG/DEO	FRH/ECO

6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es)

CCD
CARACTERIZAÇÃO
IMAGEAMENTO

7. C.D.U.: 621.3.049.774

8. Título INPE-4361-TDL/301

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CARACTERIZAÇÃO DE CCDs

10. Páginas: 139

11. Última página: C.2

12. Revisada por

Mário Luiz Pelingardi

9. Autoria José Dias de Matos

13. Autorizada por

Dr. Marco Antonio Raupp
Diretor Geral

Assinatura responsável José Dias de Matos

14. Resumo/Notas

Apresentam-se o desenvolvimento e a construção de um sistema de caracterização de CCDs controlado por um microcomputador. Tal sistema será utilizado na caracterização e seleção de detetores CCD empregados em câmeras de sensoriamento remoto no INPE. Apresentam-se ainda os resultados de alguns testes efetuados com o sistema.

15. Observações Dissertação de mestrado em Eletrônica e Telecomunicações, aprovado em 28 de julho de 1986.

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Eletrônica e Telecomunicações

Dr. Plinio Tissi — Presidente

Doc.Ing. Mario Luiz Selingardi — Orientador

Engº Marcus Antonius A.Siqueira,Mestre — Co-Orientador

Dr. Darcy Domingues Novo — Membro da Banca -Convidado-

Engº Antonio Lopes Filho, Mestre — Membro da Banca

Candidato: José Dias de Matos

São José dos Campos, 28 de julho de 1986

Dedico este trabalho à minha esposa Silmara e aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao INPE e a todos os colegas que possibilitaram o êxito deste trabalho.

ABSTRACT

The development and construction of a microcomputer-controlled CCD characterization system are presented. Such a system will be utilized in characterization and selection of CCD detectors employed in remote sensing cameras at INPE. The results of some tests carried out with the system are also shown.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS xi

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 1

1.1 - Apresentação 1
1.2 - Vantagens de sistemas imageadores do tipo CCD 1
1.3 - Necessidade de caracterização 2

CAPITULO 2 - PRINCÍPIOS FÍSICOS DO CCD 5

2.1 - Partes de um CCD para imageamento 5
2.2 - Transporte de cargas 5
2.3 - Testes necessários para caracterização 7
2.4 - Métodos de medida 10
2.4.1 - Eficiência de transferência 10
2.4.2 - Sinal e ruído de escuro 14
2.4.3 - Aquisição e impressão de uma linha 15
2.5 - Outras medidas 15
2.5.1 - Uniformidade pancromática, nas bandas espectrais e no escuro 15
2.5.2 - Tensão de saturação e linearidade 16
2.5.3 - "Cross-talk" 18
2.5.4 - Sensibilidade 19
2.5.5 - Resposta espectral 21
2.5.6 - Função de transferência de modulação (FTM) 22
2.5.7 - Montagens ópticas 25

CAPÍTULO 3 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA 29

3.1 - Diagrama de blocos 29
3.1.1 - O microcomputador 32
3.1.2 - Interface 33
3.1.3 - Circuito de acionamento do CCD 33
3.1.4 - Conversor analógico/digital 37
3.1.5 - Memória intermediária 38
3.1.6 - Circuito de controle e endereçamento 38
3.1.7 - Seletor de "pixels" 39
3.1.8 - Placa do CCD 40

Pág.

3.2 - Temporização 41
3.2.1 - Escrita de dados na memória intermediária 41
3.2.2 - Leitura de dados da memória intermediária 43

CAPÍTULO 4 - DETALHAMENTO DA ELETRÔNICA 47

4.1 - Interface 47
4.2 - Circuito de acionamento do CCD 50
4.3 - Conversor analógico/digital (A/D) 54
4.4 - Memória intermediária 57
4.5 - Circuito de controle e endereçamento 59
4.6 - Circuito seletor de "pixels" 62
4.7 - Placa do CCD 65
4.8 - Observações 70

CAPÍTULO 5 - PROGRAMAÇÃO UTILIZADA 73

5.1 - Sinais para aquisição de uma linha 74
5.2 - Escolha de elementos a serem digitalizados 74
5.3 - Ajuste do tempo de integração 75
5.4 - Leitura da memória intermediária 77
5.5 - Diagrama de blocos do programa para aquisição de uma linha . 78
5.6 - Diagrama de blocos do programa para medida da eficiência de transferência do CCD 80
5.7 - Diagrama de blocos para medida do sinal e ruído de escuro .. 83

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS 87

6.1 - Aquisição de uma linha 87
6.2 - Medida da eficiência de transferência 87
6.3 - Medida do sinal e ruído no escuro 92
6.4 - Uniformidade do sinal de escuro 94
6.5 - Conclusão 96

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 99

APÊNDICE A - PROGRAMAS UTILIZADOS PARA TESTE

APÊNDICE B - FOLHA DE ESPECIFICAÇÕES DO CCD 122/142

APÊNDICE C - GLOSSÁRIO

LISTA DE FIGURAS

Pág.

2.1 - Partes constituintes de um CCD de imageamento 6

2.2 - Elementos de um CCD trifásico 8

2.3 - Perdas no deslocamento de um pulso através do registro de deslocamento analógico 10

2.4 - Resposta ao impulso de um CCD de N estágios com perda por estágio ε 12

2.5 - Sinal na saída do CCD, observando-se o pulso anterior ao principal, utilizado para descontar o sinal de escuro 13

2.6 - Os vários tipos de FTM no CCD e a FTMtotal versus frequência espacial 24

2.7 - Montagem ótica para a obtenção de um feixe de luz de intensidade uniforme 25

2.8 - Montagem ótica para determinação da resposta espectral do CCD 26

2.9 - Montagem ótica para a medida da FTM 27

3.1 - Diagrama de blocos do sistema de caracterização de CCDs 30

3.2 - Aparência física do sistema de caracterização de CCDs 31

3.3 - Sinais de acionamento do CCD 122, sinal de fim de linha e sinal de saída do CCD 35

3.4 - Diagrama de tempo para escrita de dados na memória intermediária 42

3.5 - Diagrama de tempo para leitura de dados da memória intermediária 45

4.1 - Circuito da interface microcomputador-sistema 48

4.2 - Circuito de acionamento do CCD 51

4.3 - Formas de onda do circuito de acionamento 52

4.4 - Conversor A/D 55

4.5 - Memória intermediária 58

4.6 - Circuito de controle e endereçamento 60

4.7 - Circuito seletor de "pixels" 63

4.8 - Circuito do CCD, "drivers" e amplificadores 66

4.9 - Grampeamento do sinal de vídeo do CCD 68

5.1 - Registros utilizados para o ajuste do tempo de integração .. 75

5.2 - Diagrama de blocos para aquisição e traçado dos dados de uma linha 79

5.3 - Diagrama de blocos para medida da eficiência de transferência. 81

Pág.

5.4 - Diagrama de blocos para medida do sinal e ruído de escuro .. 84

6.1 - Linha de vídeo do CCD obtida pelo sistema de caracterização de CCDs 88

6.2 - Gráfico do fim de uma linha do CCD, que mostra os sinais de referência de branco e o sinal devido à carga perdida por eles 89

6.3 - Número do "pixel" x sinal de escuro para três CCDs diferentes 95

6.4 - Número do "pixel" x sinal de escuro para os 250 "pixels" iniciais do primeiro CCD 96

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - APRESENTAÇÃO

Nos últimos anos os dispositivos de cargas acopladas (CCD -Charge Coupled Devices) passaram a ter grande importância no imageamento, notadamente na região visível e no infravermelho próximo do espectro eletromagnético.

Já existem atualmente em órbita satélites que levam como carga útil câmeras que utilizam detetores com tecnologia CCD, enquanto outros estão sendo projetados em várias partes do mundo. Entre estes estão os satélites da MECB (Missão Espacial Completa Brasileira), cuja câmera está em fase de projeto no INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais).

Pode-se ver, portanto, que o CCD terá um papel fundamental no futuro em todos os campos do imageamento, principalmente se forem considerados os novos tipos de CCD que estão sendo desenvolvidos, onde se terá acesso, por exemplo, ao infravermelho termal.

1.2 - VANTAGENS DE SISTEMAS IMAGEADORES DO TIPO CCD

As vantagens da utilização de câmeras CCD em relação a outros sistemas imageadores convencionais são imediatas:

a) varredura totalmente eletrônica, dispensando partes mecânicas móveis, tais como espelhos giratórios, motores, etc.;

b) maior confiabilidade, menor custo e maior simplicidade;

c) maior sensibilidade (maior relação sinal/ruído);

d) permitem o uso de ótica mais compacta;

e) menor consumo.

As desvantagens são poucas; uma delas é o fato de que ainda não existem comercialmente CCDs sensíveis ao infravermelho termal e distante. Pode-se também dizer que o CCD normalmente possui uma grande quantidade de detetores, o que significa uma grande quantidade de elementos para calibrar.

1.3 - NECESSIDADE DE CARACTERIZAÇÃO

Detetores CCD podem ser usados em diversos tipos de câmeras, nas mais variadas plataformas, como satélites, aeronaves, etc.

Tem-se uma grande necessidade de conhecer detalhadamente os CCDs que vão ser colocados em tais sistemas, ou seja, deve-se fazer uma completa caracterização das suas propriedades elétricas, óticas e físicas.

A caracterização pode ser feita para avaliar as características de um determinado dispositivo CCD, de uma certa tecnologia utilizada para fabricação de CCDs, ou para escolher, entre vários dispositivos, aquele que será utilizado na fabricação de um dado equipamento.

No caso da construção de uma câmera CCD, existe ainda outro motivo importante para que o CCD seja caracterizado, que é fazer uma posterior correção da imagem.

Devido à diferença de sensibilidade dos fotoelementos, o sinal de saída do CCD apresenta não-uniformidades, o que na imagem final traduz-se em riscos verticais. Se o CCD tiver sido previamente caracterizado, será possível conhecer a sensibilidade de cada detetor e definir para cada elemento um fator que será multiplicado para corrigir a imagem.

O sinal de escuro também pode ser medido e subtraído posteriormente.

Neste trabalho está descrito o projeto e teste de um sistema de caracterização de CCDs controlado por um microcomputador. Este sistema é de grande importância pelos motivos explicados acima.

Através de "software" usado no microcomputador pode-se, de maneira bastante simples, adquirir os dados necessários e fazer o posterior processamento.

CAPÍTULO 2

PRINCÍPIOS FÍSICOS DO CCD

2.1 - PARTES DE UM CCD PARA IMAGEAMENTO

Um dispositivo CCD para imageamento é constituído basicamente por três partes: detetores de radiação, registros de deslocamento analógicos e detetor de carga. Estas partes estão mostradas esquematicamente na Figura 2.1.

- *Detetor de radiação:* é a região do dispositivo onde é integrado o sinal (carga) correspondente à radiação incidente.

- *Registro de deslocamento analógico:* após terem sido integradas por um certo período de tempo nos detetores, as cargas são transferidas paralelamente para o registro de deslocamento analógico. Uma vez no registro de deslocamento, elas são transportadas sequencialmente até a saída.

- *Detetor de cargas:* na saída do registro de deslocamento há um detetor de cargas que é um conversor carga-tensão, ou seja, que deteta o "pacote" de cargas e o converte em uma tensão proporcional a ele.

2.2 - TRANSPORTE DE CARGAS

Na verdade, um CCD é um dispositivo simples. Em essência, ele é um registro de deslocamento formado por uma rede de capacitores MOS muito próximos uns dos outros. Um CCD pode armazenar e transferir sinais analógicos de carga-elétrons ou buracos, que podem ser introduzidos eletricamente ou oticamente. (Kosonocky and Sauer, 1975).

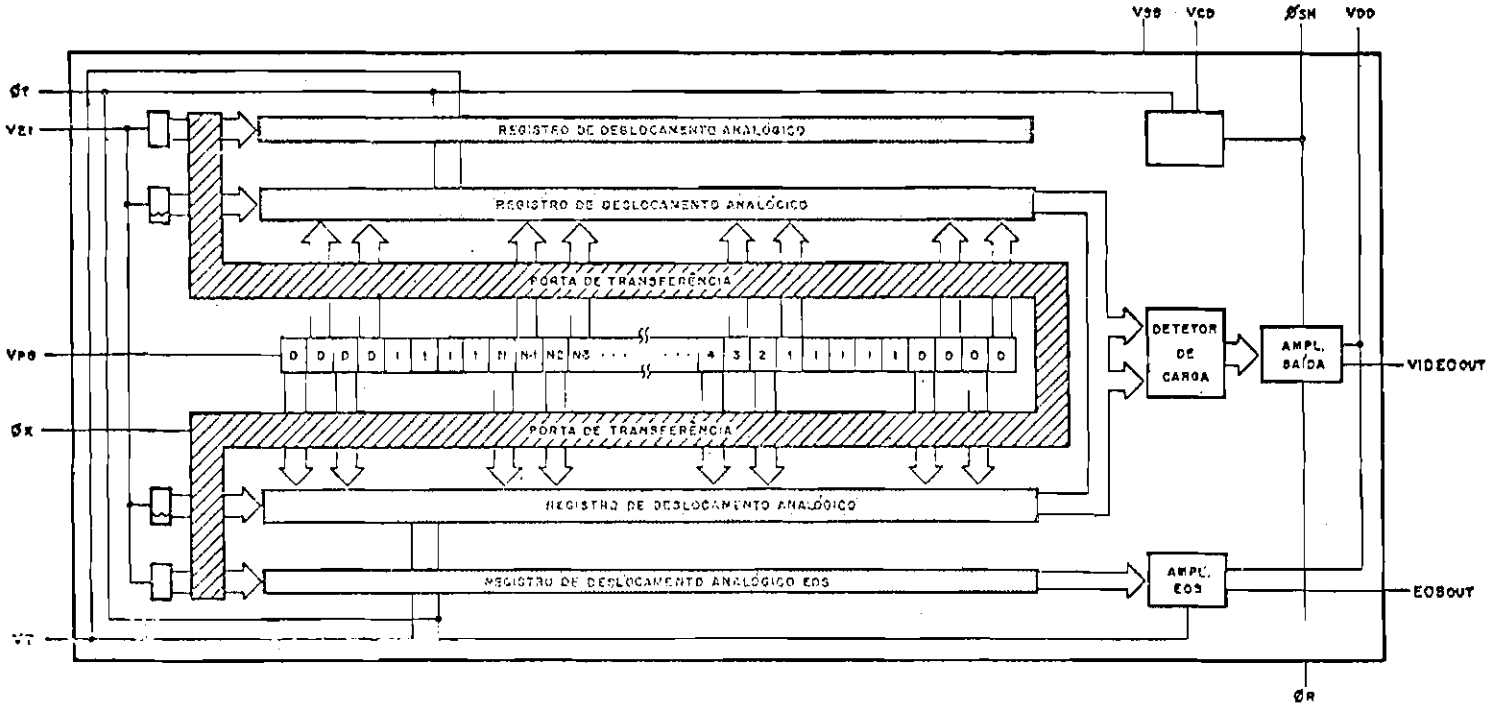


Fig. 2.1 - Partes contituintes de um CCD de imageamento.
FONTE: Fairchild CCD 122/142. Data sheet, 1979.

Para formar esses capacitores MOS utiliza-se um substrato semicondutor (do tipo P ou N). Na superfície é formado óxido de silício e sobre ele são colocados eletrodos (Figura 2.2a). Quando se aplica uma tensão adequada e esses eletrodos, aparece sob eles, no substrato, um "poço" de potencial do qual são afastados os portadores majoritários, podendo então ser ali armazenados portadores minoritários.

Através de uma pulsação adequada dessas tensões as cargas podem ser transferidas de um "poço" para outro e, assim, sucessivamente até a saída. As Figuras 2.2b e 2.2c mostram as tensões necessárias para efetuar a transferência de cargas e os "poços" de potencial durante essa transferência.

A estrutura descrita acima é um CCD trifásico, que necessita de três fases de tensões pulsadas para transferir as cargas. Isto acontece porque a dopagem do substrato é uniforme, ou seja, a estrutura é simétrica.

Se o substrato for dopado de uma forma não uniforme conveniente, poder-se-á formar um "poço" de potencial não simétrico. Isto permite a fabricação de CCDs bifásicos.

2.3 - TESTES NECESSÁRIOS PARA CARACTERIZAÇÃO

Como já foi dito anteriormente, está em fase de projeto no INPE uma câmera CCD de sensoriamento remoto (Câmera de Observação da Terra/MECB). Para que possam ser qualificados para o ambiente espacial, os detetores CCD dessa câmera devem passar pelos seguintes ensaios:

- ciclos térmicos;
- aceleração;
- vibração;
- irradiação ionizante.

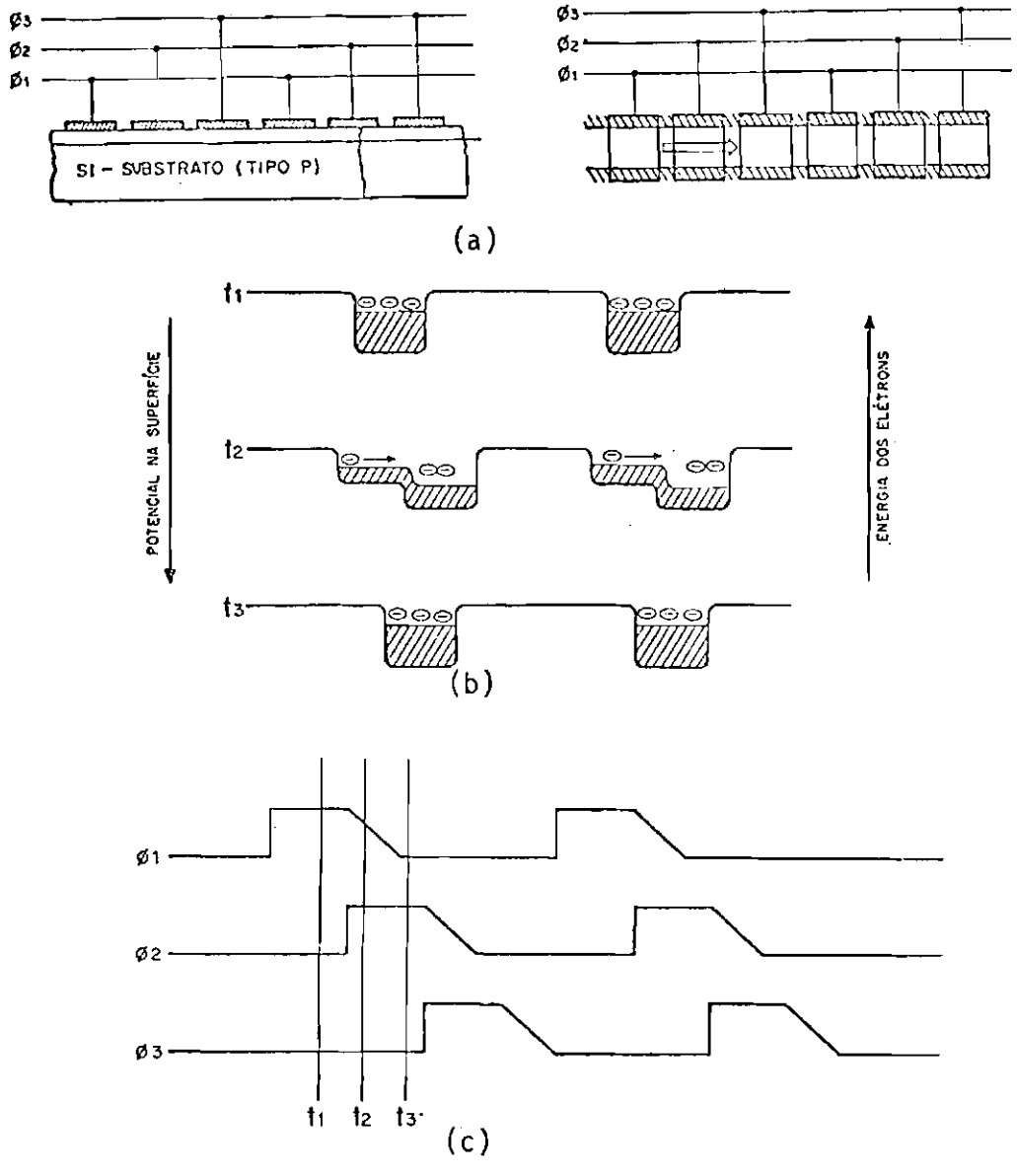


Fig. 2.2 - Elementos de um CCD trifásico:
a) substrato semicondutor que mostra as ligações dos eletrodos;
b) poços de potencial onde são armazenadas as cargas;
c) fases de onda necessárias para deslocamento das cargas.

FONTE: Kosonocky and Sauer (1975), p. 59.

Antes e depois de cada um desses ensaios os detetores deverão ser caracterizados, o que pode ser feito efetuando um certo conjunto de medidas tais como:

1) perdas de transferência;
2) uniformidade pancromática e nas bandas espectrais;
3) uniformidade do sinal de escuro;
4) sinal e ruído no escuro;
5) ruído com iluminação;
6) sensibilidade pancromática e nas bandas espectrais;
7) resposta espectral;
8) tensão de saturação e linearidade;
9) potência consumida;
10) corrente de fuga;
11) função de transferência de modulação (FTM).

Estes são os testes mais importantes a serem feitos para a caracterização de um CCD, embora não sejam os únicos.

Este trabalho analisa as medidas citadas acima sem, no entanto, efetuar todas, e demonstra que o sistema desenvolvido terá capacidade para fazer a maior parte delas se for operado convenientemente. Como fazer isso? No fundo quase todas as medidas começam com a aquisição do sinal de saída do CCD, embora em cada uma delas o detetor esteja colocado em uma situação diferente, por exemplo, com uma óptica diferente.

Assim, podem-se fazer quase todas as medidas mudando a óptica e o programa que vai controlar o sistema através do microcomputador. O microcomputador pode controlar o sistema para adquirir os dados necessários, fazer o processamento indicado para aquele caso e fornecer o resultado.

Uma vez que seria matéria suficiente para outro trabalho efetuar todas as medidas de caracterização, foram efetuadas medidas em apenas três itens para mostrar a operacionalidade do sistema. Os resultados desses testes serão apresentados no último capítulo deste trabalho.

Os três testes que foram feitos são medidas das perdas de transferência, medidas de sinal e ruído no escuro e aquisição de uma linha que é mostrada na tela de alta resolução do microcomputador e impressa numa impressora gráfica.

2.4 - MÉTODOS DE MEDIDA

2.4.1 - EFICIÊNCIA DE TRANSFERÊNCIA

Injeta-se um "pacote" de carga no registro de deslocamento analógico, iluminando-se apenas um detetor com uma montagem óptica, ou eletronicamente quando possível. Esse "pacote" é deslocado através de todo o registro de deslocamento analógico e à sua saída mede-se a amplitude do primeiro pulso e dos pulsos subsequentes (Figura 2.3). Através das suas amplitudes pode-se avaliar o $N\varepsilon$ (fração de carga perdida durante N transferências). O ε é a fração de carga perdida por transferência.

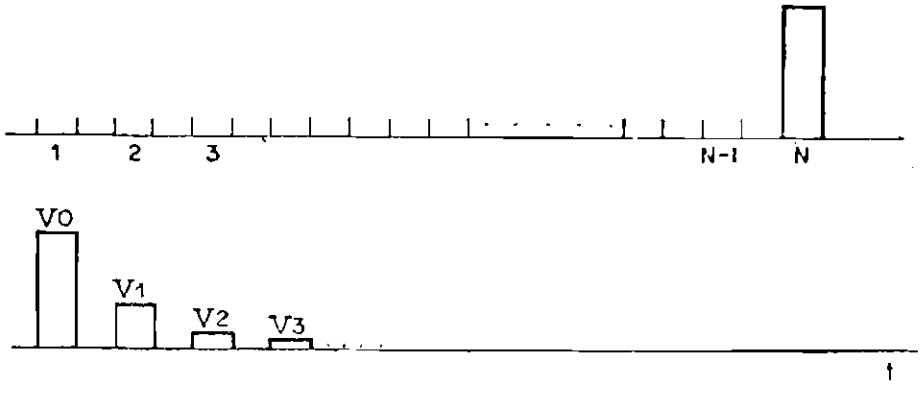


Fig. 2.3 - Perdas no deslocamento de um pulso através do registro de deslocamento analógico.

Como ε é por definição a fração perdida em cada transferência, $1-\varepsilon$ é a fração transmitida, ou seja, a eficiência na transferência de carga.

Para N transferências tem-se:

$$\frac{V_o}{V_i} = (1 - \varepsilon)^N . \qquad (2.1)$$

Considerando uma aproximação de 1ª ordem para $N\varepsilon << 1$:

$$\frac{V_o}{V_i} = (1 - \varepsilon)^N \cong 1 - N\varepsilon ; \qquad (2.2)$$

portanto, $N\varepsilon$ é a fração de carga perdida em N transferências se $N\varepsilon << 1$.

A Tabela 1 permite calcular a amplitude do pulso principal e dos pulsos subsequentes. A saída aproximada é obtida tomando o limite quando $\varepsilon \to 0$, $N \to \infty$ enquanto $N\varepsilon$ permanece constante.

TABELA 1

RESPOSTA AO IMPULSO DE UM CCD DE N ESTÁGIOS COM PERDA ε POR ESTÁGIO

PERÍODO DO "CLOCK"	SAÍDA EXATA	SAÍDA APROXIMADA
N	$(1 - \varepsilon)^N$	$e^{-N\varepsilon}$
N + 1	$N\varepsilon(1 - \varepsilon)^N$	$N\varepsilon e^{-N\varepsilon}$
N + 2	$\frac{N(N+1)\varepsilon^2}{2}(1 - \varepsilon)^N$	$\frac{(N\varepsilon)^2 e^{-N\varepsilon}}{2}$
⋮	⋮	⋮
N + n	$\left[\begin{matrix} N+n-1 \\ n \end{matrix}\right]\varepsilon^n(1-\varepsilon)^N$	$\frac{(N\varepsilon)^n}{n!} e^{-N\varepsilon}$

FONTE: Howes and Morgan (1979), p. 107.

Na Figura 2.4 tem-se um gráfico que mostra as amplitudes dos pulsos (normalizadas) para vários Nε.

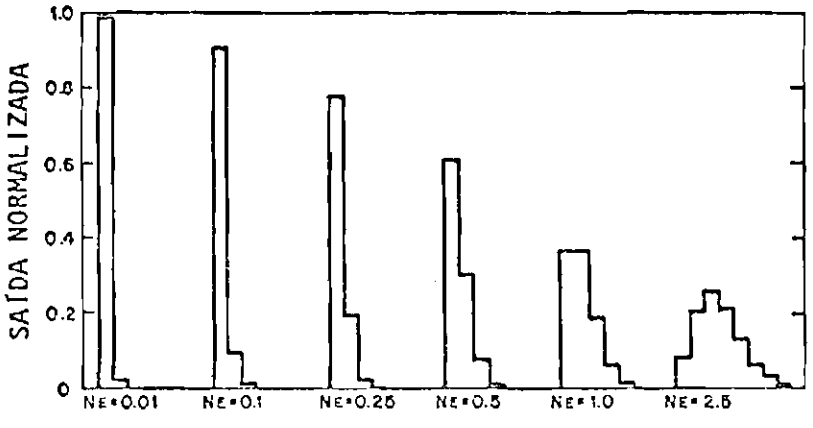


Fig. 2.4 - Resposta ao impulso de um CCD de N estágios com perda por estágio ε.
A saída aproximada dada na terceira coluna da Tabela 1 é plotada para vários valores de Nε.
FONTE: Howes and Morgan (1979), p. 107.

Portanto, utilizando a Tabela 1 pode-se calcular a amplitude de todos os pulsos resultantes após a transferência de um pulso através do registro de deslocamento analógico do CCD.

Ainda observando a tabela vê-se que o pulso principal sai do CCD com uma fração $(1 - \varepsilon)^N$ do pulso original e o segundo pulso sai com uma fração $N\varepsilon(1 - \varepsilon)^N$ do pulso original. Observa-se portanto que, dividindo a amplitude do segundo pulso pela do primeiro obtém-se Nε, ou seja:

$$\frac{V_1}{V_0} = N\varepsilon, \qquad (2.3)$$

a qual fornece um método para medida de Nε.

Na Expressão 2.3 não está sendo levado em conta o aparecimento do sinal de escuro do CCD; deve-se portanto descontar o seu efeito.

Pode-se medir o sinal de escuro medindo a amplitude do sinal do elemento anterior ao que está sendo analisado (Figura 2.5).

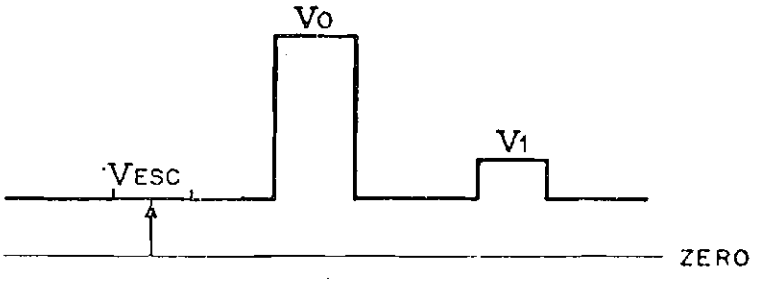


Fig. 2.5 - Sinal na saída do CCD, observando-se o pulso anterior ao principal, utilizado para descontar o sinal de escuro.

Então, descontando o sinal de escuro tem-se:

$$N_E = \frac{V_1 - V_{esc}}{V_o - V_{esc}} . \qquad (2.4)$$

É interessante notar que para esta medida de N_E não há necessidade de conhecer a amplitude inicial do pulso, mas apenas a amplitude final e a do pulso seguinte.

Como havia sido citado anteriormente, o pulso utilizado nesta medida pode ser introduzido tanto por meios ópticos como por meios eletrônicos. O CCD utilizado para testar o sistema aqui descrito (CCD 122DC-Fairchild) possui um pulso denominado "White Reference" (Referência de Branco).

Ele é gerado no começo do registro de deslocamento analógico e deslocado através de todo o registro até a saída. Então, deixando o CCD no escuro, pode-se utilizar esse pulso para medir a eficiência de transferência, uma vez que não importa a sua amplitude inicial.

2.4.2 - SINAL E RUÍDO DE ESCURO

Quando o CCD está sem iluminação, idealmente não deveria haver nenhum sinal, mas devido à geração térmica aparece o chamado sinal de escuro. Este sinal aumenta com a temperatura e com o tempo de integração, que é o tempo permitido para a coleta de cargas.

Além do sinal de escuro tem-se o ruído de "pixel" individual, que nada mais é do que a incerteza na medida do número de elétrons no "poço" de potencial.

Para medir esses dois parâmetros, deixa-se o CCD no escuro e mede-se o sinal do "pixel" analisado várias vezes (por exemplo, 100 vezes).

Denota-se cada medida pelo índice i. O sinal de escuro será a média das medidas (Lindgren and McElrath, 1969):

$$V_{CCDmédio} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} V_{CCD(i)}. \qquad (2.5)$$

Conhecendo a média pode-se calcular a variância:

$$\text{Variância} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} [V_{CCD(i)} - V_{CCD\ médio}]^2. \qquad (2.6)$$

O desvio padrão é a raiz quadrada da variância:

$$\text{Desvio padrão} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} [V_{CCD(i)} - V_{CCDmédio}]^2}. \qquad (2.7)$$

O desvio padrão é justamente a tensão eficaz do ruído na saída do CCD.

2.4.3 - AQUISIÇÃO E IMPRESSÃO DE UMA LINHA

Neste teste ilumina-se o CCD com *uma fonte qualquer*, adquire-se uma linha e mostra-se o sinal graficamente na tela de alta resolução do microcomputador e na impressora gráfica.

O sinal medido do CCD neste teste não é relevante, uma vez que não é utilizado nenhum sistema óptico para obter a iluminação.

É utilizada simplesmente luz ambiente para gerar uma linha de vídeo. O intuito é exemplificar a aquisição de uma linha pelo sistema de caracterização de CCDs e mostrar que pode ser traçada a forma do sinal da linha.

2.5 - OUTRAS MEDIDAS

Na seção anterior foram discutidos os métodos de medida para os testes efetuados sobre o sistema de caracterização de CCDs. Agora é dado de forma sucinta um roteiro para a realização das demais medidas de caracterização de CCDs.

Este roteiro, embora obviamente não preveja todos os problemas que serão encontrados na caracterização, será de grande utilidade na futura utilização do sistema.

2.5.1 - UNIFORMIDADE PANCROMÁTICA, NAS BANDAS ESPECTRAIS E NO ESCURO

Quando o CCD vai trabalhar em uma banda espectral bem definida, a uniformidade deve ser medida para essa banda.

Utiliza-se a montagem 1 da Seção 2.5.7.

. Pega-se o sinal para todos os elementos.

. Faz-se a média para um certo número de linhas, para que seja eliminado o ruído temporal.

. Para todas as bandas é fornecida uma curva de uniformidade V_{CCD} = f (nº "pixel"), sendo o meio da escala o valor médio da informação de vídeo de todos os elementos.

. Podem-se assinalar sobre a curva o valor médio e um valor $\pm$ x%.

. Pode-se fornecer o número de picos fora de $\pm$ x%, ou entre x% e y% do valor médio.

. Pode-se fornecer a diferença entre a média dos elementos pares e dos elementos ímpares.

. Pode-se escolher o elemento representativo da barra de detetores CCD. Este elemento pode ser o elemento central da barra, desde que ele não tenha um desvio superior, por exemplo, a 2% da média dos detetores.

2.5.2 - TENSÃO DE SATURAÇÃO E LINEARIDADE

Existem dois modos de medir a linearidade: 1) variando a potência incidente sobre o detetor e mantendo constante o tempo de integração; 2) mantendo a potência constante e variando o tempo de integração. Os dois métodos são equivalentes, mas o segundo apresenta a vantagem de poder controlar o tempo de integração com precisão. Portanto, este é o método utilizado.

Utiliza-se a montagem 1 da Seção 2.5.7.

Ajusta-se o tempo de integração para um valor elevado. O nível de iluminação é ajustado para obter a saturação da barra.

Considera-se que a barra está saturada quando os primeiros elementos cobertos do fim da barra estão saturados.

Em seguida o computador faz decrescer o tempo de integração e guarda o sinal de vídeo para cada valor. Traça então a curva $V_{CCD} = f(T_i)$.

Em seguida traça-se a melhor reta e elimina-se a zona acima do cotovelo de saturação. A melhor reta é traçada pelo método dos mínimos quadrados, e um coeficiente de correlação é determinado sobre a curva de linearidade.

O coeficiente R permite medir o grau de dispersão dos pontos ao redor da reta.

Se a reta é:

$$y = mx + b \tag{2.8}$$

e se σx e σy são os desvios padrão de x e y, o coeficiente de correlação se escreve:

$$R = m \frac{\sigma x}{\sigma y}, \tag{2.9}$$

onde:

$$\sigma x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} x_i^2}{N} - \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N}\right)^2}, \tag{2.10}$$

$$\sigma y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} y_i^2}{N} - \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} y_i}{N}\right)^2}, \tag{2.11}$$

$$m = \frac{\dfrac{\sum_{i=1}^{N} x_i \sum_{i=1}^{N} y_i}{N} - \sum_{i=1}^{N} (x_i\, y_i)}{\dfrac{(\sum_{i=1}^{N} x_i)^2}{N} - \sum_{i=1}^{N} (x_i)^2} \qquad (2.12)$$

e

$$b = \bar{y} - m\,\bar{x}, \qquad (2.13)$$

com

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N} \qquad \text{e} \qquad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{N} y_i}{N}.$$

Quanto mais próximo de um for o valor de R, maior será a linearidade do CCD.

2.5.3 - "CROSS-TALK"

O "cross-talk" é a incorporação ao sinal de um "pixel" de parte do sinal de outros "pixels" adjacentes. Ele deteriora a função de transferência de modulação do sistema ótico, ou seja, reduz a resolução espacial do sistema.

Existem várias causas de "cross-talk"; uma delas é a não absorção dos fótons por um fotoelemento do CCD. Este sinal pode sofrer múltiplas reflexões e somar-se ao sinal de fotoelementos adjacentes. Isto é o "cross-talk" ótico.

A ineficiência de transferência de carga também introduz "cross-talk", mas como esta medida já é feita isoladamente, não será incluída nesta seção.

Outro fator importante de "cross-talk" é a absorção de fótons fora da região de depleção. As cargas assim geradas vão somar-se por difusão ao sinal de fotoelementos próximos, o que deteriora a resolução espacial do detetor.

Existem várias maneiras de medir o "cross-talk", que dependem de como se ilumina o CCD e como se mede o sinal. Uma vez escolhido um modo, deve-se fazer a medida sempre nas mesmas condições para poder fazer comparações.

Um modo interessante de fazer a medida é iluminar o CCD total e uniformemente e medir o sinal dos elementos cobertos por metalização opaca, localizados no fim da barra.

Para o CCD de 1728 elementos, o computador deve medir o sinal para os "pixels" 1727 e 1731, com iluminação e no escuro.

Utiliza-se o "pixel" 1731 porque o 1729, que é o primeiro "pixel" coberto, possui uma grande componente de carga devida às perdas de transferência.

Deve ser então aplicada a seguinte equação:

$$\text{"CROSS-TALK"} = \frac{(V_{CCD} - V_{esc})\ 1731}{(V_{CCD} - V_{esc})\ 1727}. \qquad (2.14)$$

2.5.4 - SENSIBILIDADE

Pode ser medida a sensibilidade pancromática ou a sensibilidade nas bandas espectrais. Estas medidas são feitas para um "pixel" que representa a barra.

Coloca-se um radiômetro na posição do CCD para medir a potência incidente por cm^2. Assim calcula-se a energia incidente durante o tempo de integração.

Agora podem-se calcular as figuras de mérito:

- *Sensibilidade:* é o sinal de saída do CCD por unidade de energia incidente, ou seja, a tensão na saída do CCD dividida pelo nível de exposição:

$$S = \frac{V_{CCD}}{E_i} \left[\frac{V cm^2}{\mu J} \right], \tag{2.15}$$

onde:

V_{CCD} = sinal na saída do CCD;
E_i = energia incidente por cm^2 durante o tempo de integração.

- *Exposição Equivalente de Ruído:* é o nível de exposição capaz de gerar um sinal igual ao ruído eficaz na saída do CCD:

$$NEE = E_i \frac{V_{RMS}}{V_{CCD}} = \frac{V_{RMS}}{S} \left[\frac{nJ}{cm^2} \right], \tag{2.16}$$

$$NEE_{escuro} = \frac{V_{RMS_{escuro}}}{S}, \tag{2.17}$$

onde:

V_{RMS} = tensão eficaz de ruído na saída do CCD;
$V_{RMS_{escuro}}$ = tensão eficaz de ruído na saída do CCD no escuro.

- *Relação sinal/ruído:* é o sinal na saída do CCD dividido pelo valor eficaz do ruído ou é a exposição dividida pela exposição equivalente de ruído:

$$\frac{S}{R} = \frac{V_{CCD}}{V_{RMS}} = \frac{E_i}{NEE}. \tag{2.18}$$

- *Faixa Dinâmica:* exposição de saturação dividida pela exposição equivalente de ruído no escuro.

$$F.D. = \frac{E_{sat}}{NEE_{escuro}}, \qquad (2.19)$$

onde:

E_{sat} = exposição de saturação do CCD.

2.5.5 - RESPOSTA ESPECTRAL

O CCD é colocado em frente à saída do monocromador utilizando a montagem 2 da seção 2.5.7.

A emissão do monocromador normalmente não é uniforme dentro de todo o espectro; por esse motivo deve ser anotada, a cada medida, a potência na sua saída. Isto é feito substituindo o CCD por um radiômetro.

A faixa espectral analisada deve ser varrida, anotando a cada passo $V_{CCD}(\lambda)$ e $P(\lambda)$, onde $P(\lambda)$ é a potência na saída do monocromador. Se for necessário traçar a curva $V_{CCD} = f(\lambda)$, deverá ser aplicado a cada valor de V_{CCD} um fator corretivo calculado a partir das potências medidas, de modo que a emissão do monocromador possa ser considerada uniforme na faixa espectral analisada.

Mais interessante é traçar a curva da sensibilidade espectral versus o comprimento de onda. Como a sensibilidade é o sinal do CCD dividido pela exposição, a correção da uniformidade da saída do monocromador já está implícita.

A curva da resposta espectral é traçada para três "pixels": um no centro e um em cada ponta da barra.

As curvas típicas para o CCD 122 podem ser observadas no Apêndice B, que é a sua folha de especificações.

2.5.6 - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO (FTM)

Um fator importante para a caracterização de qualquer sistema ótico é a avaliação da sua resolução espacial, ou seja, a capacidade de distinguir dois pontos muito próximos na imagem. A resolução espacial é avaliada através do levantamento da curva da função de transferência de modulação (FTM).

Para o levantamento da FTM normalmente são imageados padrões com frequências espaciais diferentes, e é traçada a curva de contraste versus frequência espacial (dada em pares de linhas por mm).

A FTM na verdade é a resposta do sistema a padrões senoidais, mas geralmente são utilizados para o levantamento da resolução espacial padrões de barras claras e escuras.

Neste caso a função de transferência é mais propriamente denominada função de transferência de contraste (FTC).

No caso do CCD existem três fatores que limitam a resolução espacial:

1) *FTMgeométrica:* é a limitação mais forte, relacionada com a construção física dos elementos detetores. Ela é calculada da transformada de Fourier da célula básica de integração, que relaciona o tamanho e o deslocamento dos elementos. A FTMgeométrica é dada por (Beynon and Lamb, 1980):

$$\text{FTMgeométrica} = \frac{pf_o}{\pi \Delta x f} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi \Delta x f}{pf_o}\right), \qquad (2.20)$$

onde:

f = frequência espacial (pl/mm);

f_o = número de elementos por mm;

Δx = largura do elemento;

p = distância entre os centros dos elementos.

2) *FTMtransferência:* é a redução da resolução espacial devido às perdas de transferência de carga. É dada por (Beynon and Lamb, 1980):

$$\text{FTMtransferência} = \exp\{-N\varepsilon(1 - \cos 2\pi \frac{f}{f_o})\}, \qquad (2.21)$$

onde:

$N\varepsilon$ = perda de carga em N transferências com perda ε por transferência.

3) *FTMdifusão:* quando as cargas não são geradas no fotoelemento e sim no interior do substrato, elas se deslocam por difusão para os fotoelementos mais próximos, provocando uma perda de resolução espacial. Este efeito é mais importante para comprimentos de onda longos, porque têm uma grande profundidade de absorção no silício. A FTMdifusão é dada por (Barbe, 1975):

$$\text{FTMdifusão} = \frac{\cosh(d/L_o)}{\cosh(d/L)}, \qquad (2.22)$$

onde:

$L^{-2} = L_o^{-2} + (2\pi f)^2$;

d = distância da região de depleção ao local onde os fótons foram absorvidos;

L_o = comprimento de difusão no silício.

Quando um sistema ótico possui vários tipos de FTM, o resultado total é dado pelo produto:

$$\text{FTMtotal} = \text{FTMgeométrico}.\ \text{FTMtransferência}.\ \text{FTMdifusão}. \qquad (2.23)$$

Utilizando nas equações anteriores valores típicos do CCD, podem-se traçar os vários tipos de FTM e a sua resultante. Isto pode ser visto na Figura 2.6 (Barbe, 1975).

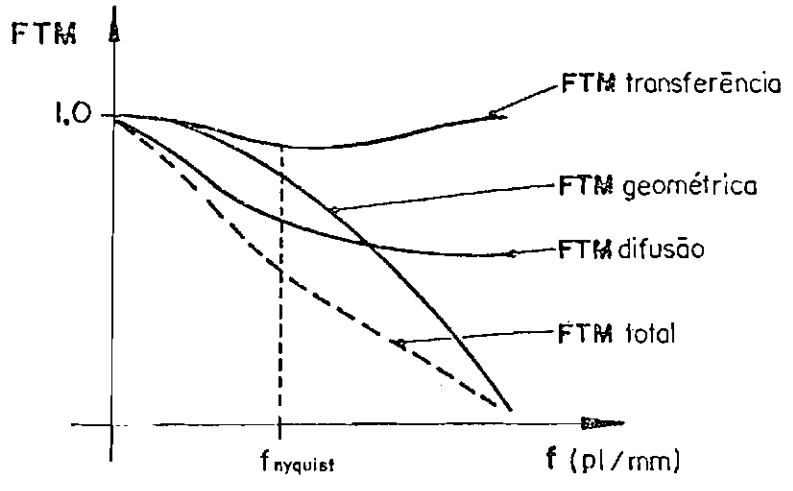


Fig. 2.6 - Os vários tipos de FTM no CCD e a FTMtotal versus frequência espacial.

A resolução do sistema é limitada pela frequência de Nyquist, que é a frequência de corte.

Esta frequência ocorre quando uma das barras (clara ou escura) do padrão de barras cobre um único elemento totalmente. Ela é, portanto, a metade da frequência de fotoelementos (para o CCD 122 fNyquist= 38,5pl/mm).

Para a medida da função de transferência de modulação é utilizada a montagem 3 da seção 2.5.7.

Entre a esfera integradora e o CCD colocam-se um padrão de barras e uma objetiva de microscópio (x 10). Devido à redução provocada pela objetiva, a frequência espacial sobre o CCD é dez vezes maior que a do padrão de barras.

Utilizam-se padrões com frequências de 1 a 7pl/mm, o que resultará sobre o CCD em frequências de 10 a 70pl/mm, faixa suficiente para a sua caracterização.

O CCD é regulado para receber a imagem sobre o "pixel" escolhido. A montagem é ajustada para que se possa pegar o sinal máximo (V_M) e o sinal mínimo (V_m) correspondentes às barras clara e escura. É medido também o sinal de escuro (V_{esc}).

Como já foi dito, por causa da utilização de padrões de barras claras e escuras, é mais apropriado chamar a função de transferência de função de transferência de contraste (FTC). Então, aplicando a definição e descontando o sinal de escuro, obtém-se:

$$FTC = \frac{V_M - V_m}{V_M + V_m - 2V_{esc}} . \qquad (2.24)$$

Este procedimento é repetido para cada padrão de barras, e ao final da aquisição poderá ser traçada a curva da FTC.

2.5.7 - MONTAGENS ÓTICAS

São utilizadas diversas montagens óticas, dependendo do tipo de medida a ser efetuada.

- Montagem 1:

A montagem da Figura 2.7 é utilizada para a medida da uniformidade, tensão de saturação e linearidade, "cross-talk" e sensibilidade.

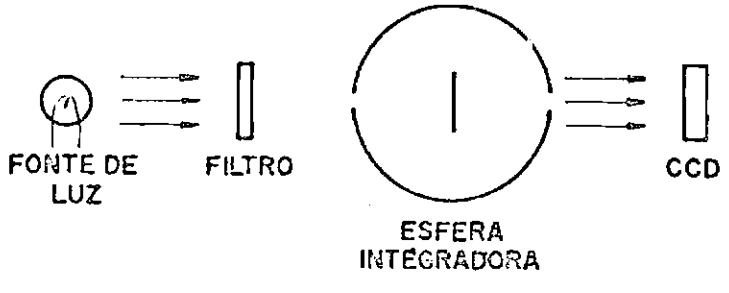


Fig. 2.7 - Montagem ótica para a obtenção de um feixe de luz de intensidade uniforme.

Esta montagem consiste simplesmente na associação de uma fonte de luz (por exemplo, uma lâmpada de tungstênio) à entrada da esfera integradora. Entre a fonte de luz e a esfera integradora pode ser colocado qualquer filtro desejado.

A esfera integradora apresenta à sua saída um feixe de luz de intensidade uniforme, suficiente para iluminar o CCD inteiro.

- Montagem 2:

A montagem ótica da Figura 2.8 é utilizada para a determinação da resposta espectral do CCD.

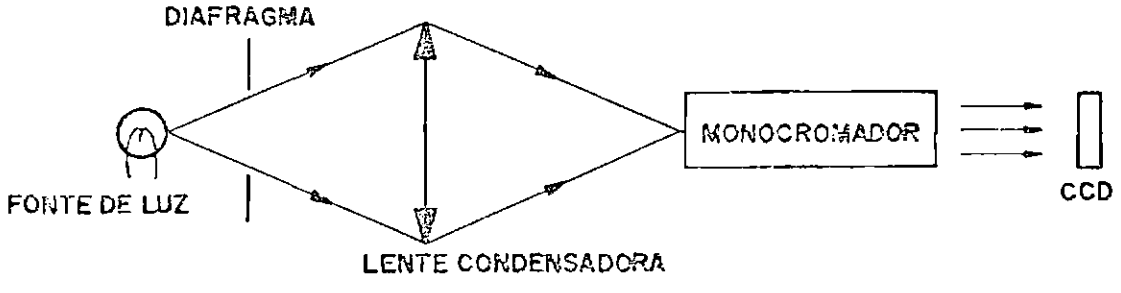


Fig. 2.8 - Montagem ótica para determinação da resposta espectral do CCD.

Nesta montagem utiliza-se uma lente condensadora para a focalização do sinal luminoso na fenda de entrada do monocromador. A saída do monocromador apresenta um feixe de radiação monocromática.

Variando o comprimento de onda da luz presente na saída do monocromador, pode-se levantar a curva de resposta espectral do CCD.

- Montagem 3:

A montagem ótica da Figura 2.9 é utilizada para a determinação da função de transferência de modulação (FTM) do CCD.

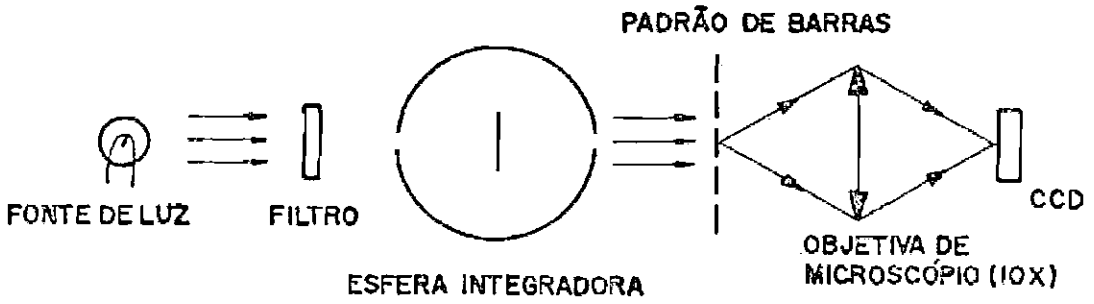


Fig. 2.9 - Montagem ótica para a medida da FTM.

Esta montagem consiste em uma fonte de luz associada à esfera integradora. À saída da esfera integradora é colocado um padrão de barras claras e escuras. A imagem do padrão de barras é formada sobre o CCD por uma objetiva de microscópio (G = 10), que produz uma redução de dez vezes no tamanho da imagem do padrão de barras. Este padrão pode ser substituído por padrões com frequências espaciais diferentes.

Medindo o sinal do CCD com padrões de barras diferentes pode-se traçar a curva da FTM.

OBS.: As curvas e os valores típicos de todas as medidas efetuadas nas seções anteriores podem ser observados no Apêndice B (folha de especificações do CCD 122).

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Neste capítulo é dada uma descrição geral do sistema dividindo-o em blocos, explicando a função de cada bloco e como eles se relacionam entre si.

3.1 - DIAGRAMA DE BLOCOS

Na Figura 3.1 é apresentado o diagrama de blocos geral do sistema, no qual se podem ver o microcomputador e seus periféricos, e a placa de interface que se localiza num dos conectores para expansão do microcomputador.

Os outros blocos são placas de circuito impresso; cada uma apresenta funções bem definidas. Cinco destas placas estão localizadas em um gabinete metálico padronizado. São elas: circuito de acionamento, conversor A/D, memória intermediária, controle e seletor de "pixels". Estes circuitos constituem o núcleo do sistema de caracterização, pois é aí que são gerados os sinais de acionamento do CCD e o sinal de saída é digitalizado e armazenado.

O outro bloco, indicado como "drivers" + pré-amplificador, é a placa que contém o CCD e está montado em uma caixa metálica separada, ligada ao núcleo do sistema por cabo paralelo. Isto é feito para que o CCD possa ser colocado à distância do sistema de medida, em uma barcada óptica.

Na Figura 3.2 tem-se um desenho bastante aproximado da forma física do sistema de caracterização de CCDs.

Agora descreve-se a função de cada item do diagrama de blocos.

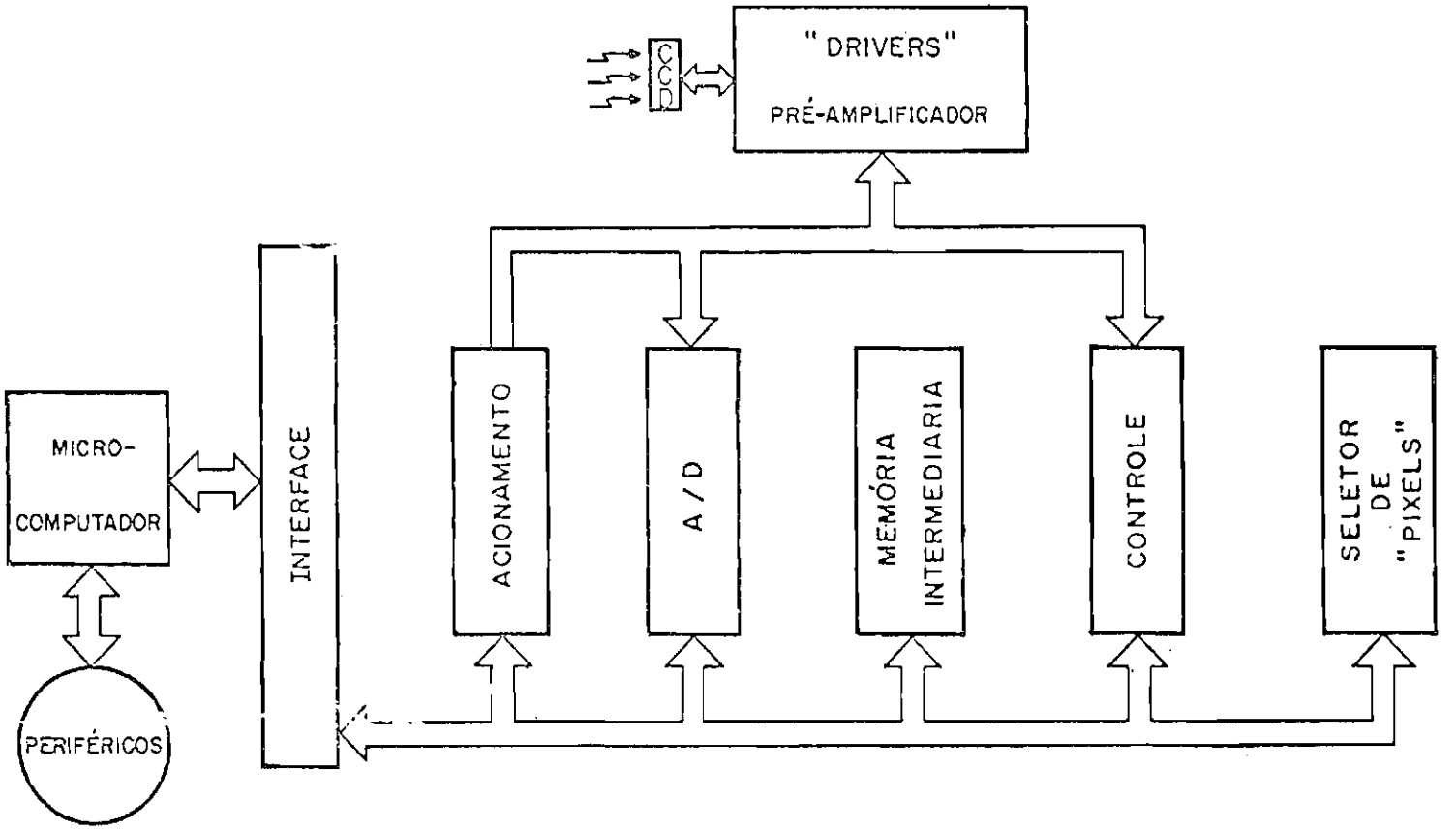


Fig. 3.1 - Diagrama de blocos do sistema de caracterização de CCDs.

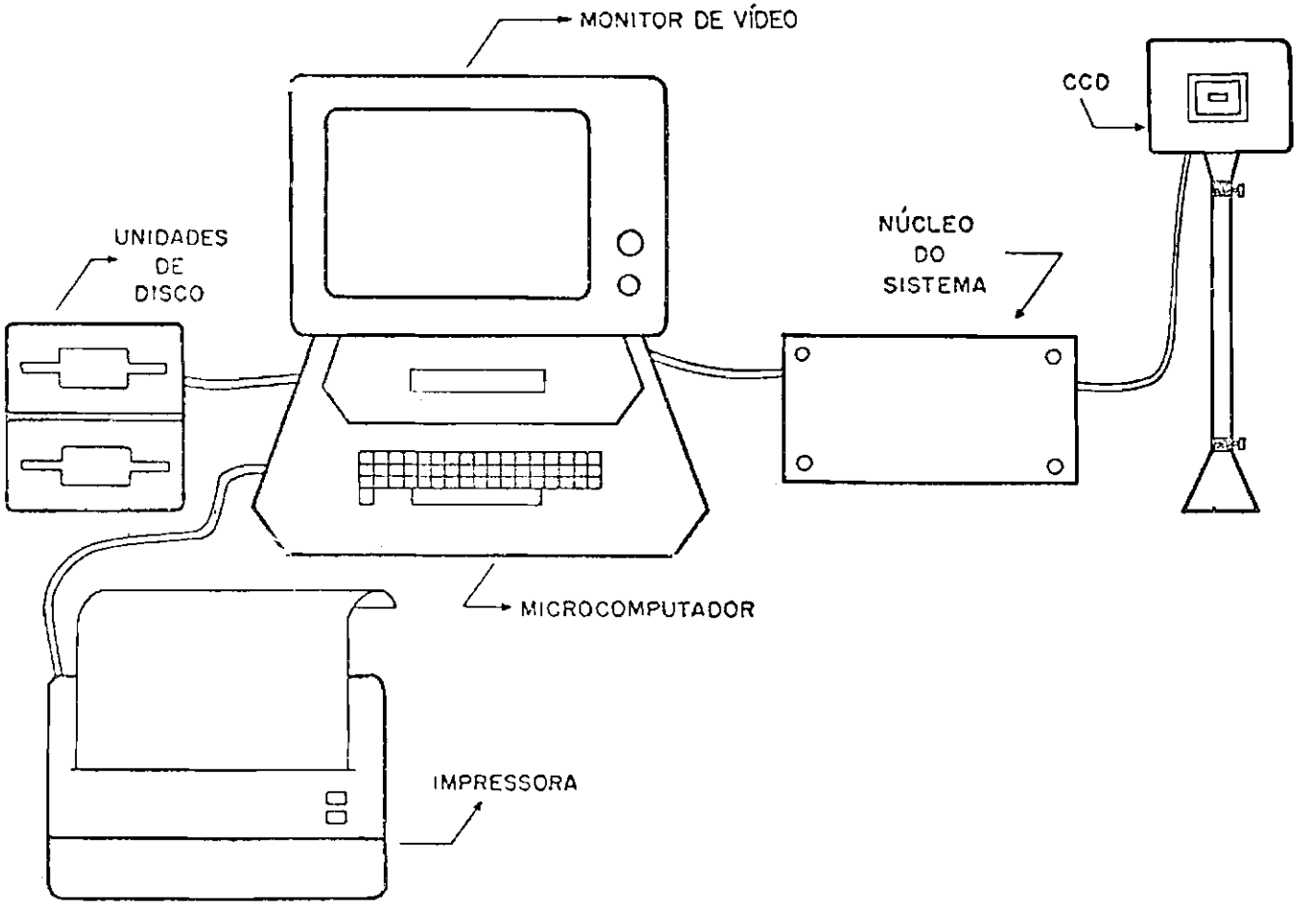


Fig. 3.2 - Aparência física do sistema de caracterização de CCDs.

3.1.1 - O MICROCOMPUTADOR

O microcomputador utilizado é um micro comercial do tipo Apple II (Craft II plus), fabricado pela MICROCRAFT. A seguir apresentam-se as suas características:

- barramento de dados: 8 bits;
- memória RAM: 48 kbytes;
- microprocessador: 6502, 1Mz (MOS Technology);
- memória ROM: 12 kbytes.

O microcomputador tem a função de controlar todo o sistema de caracterização através do programa armazenado na sua memória.

Ele pode mandar dados e sinais de controle para várias partes do sistema. Faz a leitura dos dados do sinal do CCD da memória intermediária para a sua memória interna. Uma vez com os dados, ele pode fazer os cálculos necessários, armazená-los e imprimir os resultados na tela ou na impressora.

O microcomputador assume um papel excepcionalmente importante devido à alta taxa de dados que deve ser manipulada. Devem ser adquiridos milhares e milhares de dados, o que sem a ajuda deste microcomputador seria virtualmente impossível.

Utilizam-se para o controle do sistema programas em BASIC, por ser uma linguagem fácil de utilizar e possuir as ferramentas necessárias para os cálculos (Poole et al, 1981).

Podem ser utilizadas sub-rotinas, ou até mesmo o programa inteiro em linguagem de máquina, quando houver necessidade de uma maior rapidez.

Este microcomputador foi escolhido por apresentar oito conectores onde podem ser ligadas placas de expansão, o que proporciona uma enorme facilidade de interfaceamento com outros sistemas.

3.1.2 - INTERFACE

A interface microcomputador-sistema é uma placa que fica dentro do microcomputador, em um dos seus conectores para expansão.

A estes conectores chegam todos os sinais do barramento interno do micro, os quais devem ser decodificados e transformados em sinais utilizáveis pelo sistema de caracterização.

Quando for necessário dar um pulso de controle em alguma parte do sistema, deve-se acionar um único endereço que seleciona aquela determinada linha.

Os bits de endereçamento chegam à placa de interface, são decodificados e permitem que somente a linha correspondente seja acionada.

Além de gerar pulsos de controle, a placa possui isoladores para o barramento de dados, o qual é usado quando se está enviando algum dado de controle para o sistema ou quando se está lendo a memória intermediária.

Os isoladores impedem que o sistema de caracterização carregue o barramento do micro, ou seja, puxe mais corrente do que ele pode fornecer; além disso, impedem a entrada de ruído.

3.1.3 - CIRCUITO DE ACIONAMENTO DO CCD

Como foi visto na Seção 2.2, o CCD necessita de várias tensões pulsadas para fazer o transporte de cargas no seu interior.

Estas tensões são geradas na placa do circuito de acionamento do CCD em lógica TTL, ou seja, variam entre 0 e 5V.

Um CCD pode ter estes sinais de acionamento diferentes dos de outros, dependendo da tecnologia empregada para a construção interna de cada um.

O sistema de caracterização de CCDs descrito aqui foi projetado para trabalhar com o CCD 122 da FAIRCHILD; por isso são mostrados os sinais de acionamento deste CCD na Figura 3.3.

Com pequenas modificações, o sistema de caracterização pode ser empregado para qualquer outro CCD, embora essas modificações dependam individualmente do CCD. Elas podem variar desde a substituição total do circuito de acionamento até uma simples modificação do software, passando por modificações intermediárias só possíveis de especificar para cada caso isolado.

Na Figura 3.3 podem-se observar as formas de onda aplicadas ao CCD 122, que são:

- pulsos de transferência (ϕX);
- pulsos de transporte (ϕT);
- pulsos de "reset" (ϕR).

- *Pulsos de transferência (ϕX):*

Quando este pulso é aplicado à porta de transferência, ocorre uma transferência da carga acumulada nos fotoelementos para o registro de deslocamento analógico. A partir daí os fotoelementos passam novamente a acumular carga, ou seja, o período em que os fotoelementos integram radiação da cena é o período de tempo entre dois pulsos de transferência, o que é chamado tempo de integração. Nesta placa o tempo de integração é modificado carregando um registro cujo conteúdo determina o tempo de contagem de um contador, o qual por sua vez determina a separação entre os pulsos ϕX.

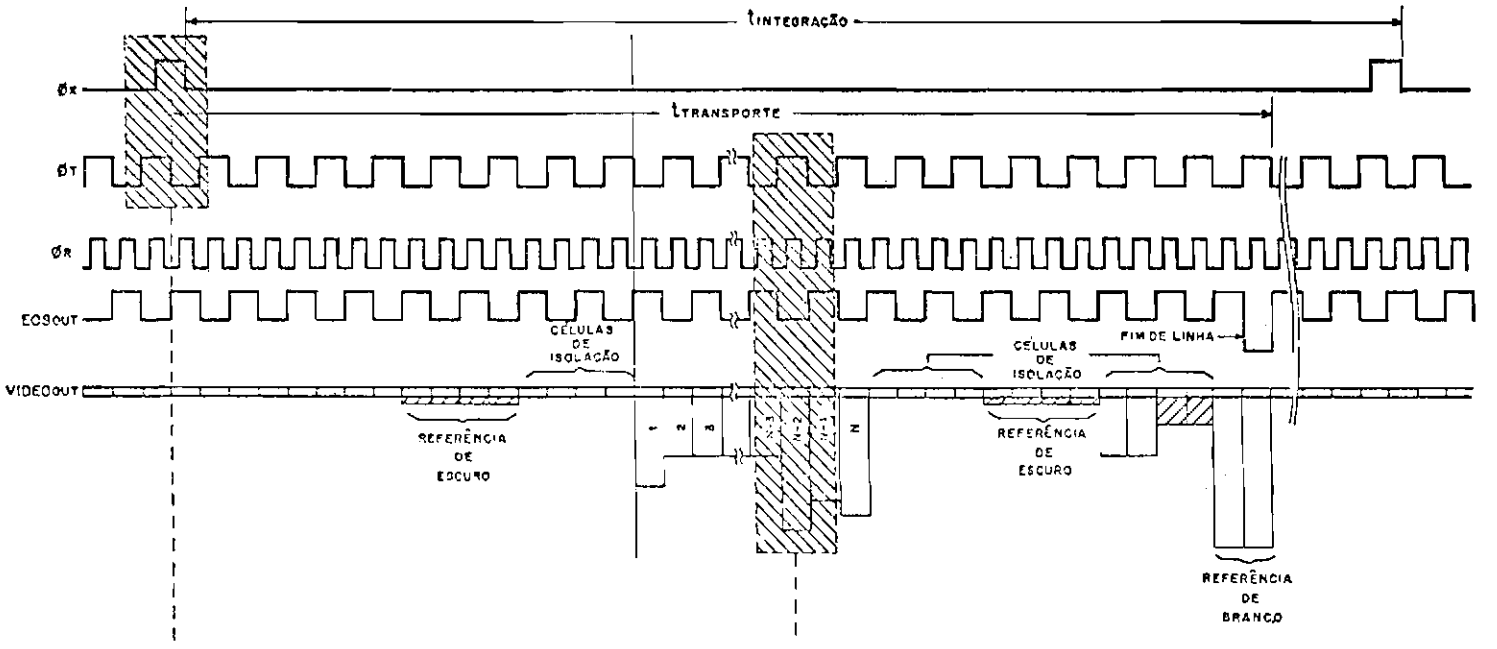


Fig. 3.3 - Sinais de acionamento do CCD 122, sinal de fim de linha e sinal de saída do CCD.

- *Pulsos de transporte (ϕT):*

É um sinal pulsado aplicado ao registro de deslocamento analógico para mover os "pacotes" de carga recebidos dos elementos sensores de imagem para o detetor de carga.

Pode-se ver na Figura 2.1 que, na verdade, existem dois registros de deslocamento analógico, um para os elementos ímpares e outro para os pares. Por esse motivo o pulso ϕT tem frequência igual à metade da frequência dos "pixels" na saída do CCD.

- *Pulsos de "reset" (ϕR):*

É um pulso utilizado para ajustar a voltagem no detetor de carga. O circuito de saída do CCD recebe os "pacotes" de carga do registro de deslocamento analógico e libera um sinal de tensão proporcional ao tamanho de cada "pacote" de carga recebido.

Antes que cada novo "pacote" de carga seja convertido, um pulso de "reset" descarrega o detetor de carga. Isto é feito para apagar a memória do "pacote" anterior, ou seja, para que um "pacote" de carga não influencie na conversão do seguinte.

Tem-se um pulso de "reset" para cada "pacote" de carga; portanto, a frequência destes pulsos é exatamente a mesma da frequência de "pixels".

Na Figura 3.3, além dos sinais de acionamento do CCD, aparecem também os sinais de fim de linha e o sinal de saída do CCD.

O sinal de fim de linha, importante para sincronização, é um pulso que aparece ao fim de cada varredura.

O sinal de saída do CCD apresenta, como pode ser visto na Figura 3.3, além das células com o sinal de vídeo válido, células com referências de escuro (dark reference) e de branco (white reference). Separando estes vários tipos de células, existem células de isolação para impedir que os sinais de umas alterem os de outras.

As referências de branco e de escuro podem ser usadas, por exemplo, para controlar o ganho de amplificação num posterior processamento do sinal de vídeo.

3.1.4 - CONVERSOR ANALÓGICO/DIGITAL

Este conversor A/D tem uma função fundamental para o sistema de aquisição de dados. Ele recebe o sinal de vídeo da saída do CCD em forma de uma tensão analógica e converte-o em uma forma digital de 12 bits de modo que esse sinal possa ser manipulado pelo microcomputador.

O momento em que o conversor A/D deve iniciar a conversão é dado por um pulso recebido da placa de controle, o qual é gerado a partir do pulso ϕR.

Quando a conversão termina, os 12 bits resultantes são colocados num registro de saída da placa, onde permanecem válidos até que uma nova conversão coloque lá um outro valor.

O próprio pulso de fim de conversão (EOC-END OF CONVERSION) do conversor A/D gera, através da placa de controle, todos os sinais necessários para que os 12 bits sejam armazenados imediatamente na memória intermediária.

O conversor A/D utilizado nesta placa (DATEL INTERSIL ADC-817) é bastante rápido, pois converte um sinal analógico em digital com 12 bits em 2μs. Portanto, a taxa de conversão está limitada a quinhentas mil conversões por segundo.

3.1.5 - MEMÓRIA INTERMEDIÁRIA

A taxa de saída dos dados do CCD é bastante alta, por isso é impossível por o microcomputador adquiri-los diretamente. Esses dados são então armazenados na memória intermediária e, após o término da aquisição, o microcomputador pode lê-los levando para isso todo o tempo que for necessário. Deste modo consegue-se adquirir os dados de todos os "pixels" de uma varredura, mesmo com um tempo de integração bastante baixo.

Assim, a taxa de aquisição de dados fica limitada somente pelo tempo de conversão do conversor A/D.

3.1.6 - CIRCUITO DE CONTROLE E ENDEREÇAMENTO

A placa de controle tem a função de gerar os sinais que coordenam o funcionamento de todas as outras placas. Ela gera os sinais de acesso, escrita, leitura e endereçamento para a memória intermediária. Fornece o sinal de conversão para o conversor A/D produzido a partir do pulso ϕR. Usa o sinal de fim de conversão do conversor A/D para gerar um pulso de habilitação para que o dado seja escrito na memória.

Recebe os sinais do computador que permitem a aquisição de uma linha do CCD, espera aparecer o pulso de início de linha, adquire-a e termina a aquisição ao receber o pulso de fim de linha.

Esta placa faz também uma espécie de chaveamento dos sinais que vão controlar a memória intermediária.

Quando esta está sendo escrita, os sinais que a controlam são gerados a partir do pulso de fim de conversão.

Quando a placa acaba a escrita, ela passa a usar sinais baseados num pulso de leitura enviado pelo computador a fim de controlar a memória, que fica disponível para leitura até que uma nova linha venha a ser adquirida.

3.1.7 - SELETOR DE "PIXELS"

Foi visto anteriormente que, na verdade, o CCD possui dois registros de deslocamento analógico: um para os "pixels" ímpares e outro para os "pixels" pares. Há situações em que interessa medir somente o sinal que foi deslocado por um único registro de deslocamento analógico.

Esta placa seletora de "pixels" apresenta quatro possibilidades:

- converter o sinal de todos os "pixels";
- converter o sinal de "pixels" ímpares;
- converter o sinal de "pixels" pares;
- desligar a conversão.

Além disso, isto traz outra vantagem. Quando está sendo convertida apenas metade dos "pixels", o conversor A/D trabalha com folga, o que permite a ele trabalhar com o dobro de frequência, ou seja, trabalhar com um tempo de integração que pode ser a metade do original.

Existe uma outra função associada a esta placa, embora não tenha nada a ver com o nome dado a ela. Os bits de dados da saída da memória intermediária passam por ela. Como o microcomputador trabalha com 8 bits de dados enquanto a saída da memória tem 12 bits, os dados têm de ser separados em duas partes para poder ser lidos pelo micro. Isto é feito utilizando dois dispositivos "tristate". A um deles ligam-se os 4 bits menos significativos e ao outro ligam-se os 8 bits mais significativos do dado de saída da memória.

De acordo com a solicitação do microcomputador da parte a ser lida, o "tristate" adequado é selecionado, o que permite a passagem dos dados pedidos.

3.1.8 - PLACA DO CCD

Esta placa é aquela na qual está montado o próprio CCD. Ela está colocada numa caixa metálica separada e ligada ao núcleo do sistema através de cabo paralelo.

Isto é feito para dar mobilidade ao CCD, ou seja, para deslocá-lo para montagem em bancadas óticas. Esta placa pode também ser montada em uma unidade de refrigeração termoelétrica, onde se podem fazer medidas com temperatura controlada. Ela possui, além do próprio CCD, os pré-amplificadores e os excitadores ("drivers").

Os "drivers" são circuitos integrados que convertem os níveis de tensão das formas de onda aplicadas ao CCD de TTL nas tensões necessárias ao seu funcionamento. Como foi visto na Seção 3.1.3, são necessárias várias formas de onda aplicadas ao CCD para que ele funcione. Essas formas de onda são geradas na placa de acionamento do CCD com níveis de tensão TTL (0 e 5V), que devem ser convertidos em níveis utilizáveis pelo CCD, os quais no caso do CCD 122 da Fairchild, são 0,3 e 10V.

Além dos "drivers", existem nesta placa os pré - amplificadores que servem basicamente para:

- dar um ganho inicial ao sinal, reduzindo sua sensibilidade ao ruído;
- isolar a saída de sinal protegendo-a contra possíveis curto-circuitos em etapas posteriores.

Imediatamente após o pré-amplificador, colocou-se um circuito de grampeamento que é utilizado para manter o nível de referência do sinal de saída em zero volts. Isto é necessário, pois o sinal de saída apresenta um nível de referência que pode variar de 3 a 10V de um CCD para outro e ainda varia com a temperatura e outros fatores.

3.2 - TEMPORIZAÇÃO

Nas seções anteriores analisou-se o funcionamento de todos os blocos do sistema de caracterização de CCDs e verificou-se que cada placa recebe e fornece vários tipos de sinais. Para que o sistema como um todo tenha um funcionamento lógico, é necessário uma temporização bem-definida.

Em alguns casos a sincronização é feita com pulsos enviados por computador; em outros, com as próprias formas de onda de acionamento do CCD.

Em seguida analisar-se-á a temporização para conversão de dados e armazenamento na memória intermediária, bem como para a leitura dos dados da mesma memória.

3.2.1 - ESCRITA DE DADOS NA MEMÓRIA INTERMEDIÁRIA

Na Figura 3.4 apresenta-se o diagrama de tempos para a escrita de dados na memória intermediária. A aquisição dos dados de uma linha do CCD ocorre quando solicitada pelo microcomputador; enquanto isto não acontece, os sinais $\overline{CE}$ e $\overline{W}$ de seleção e escrita da memória ficam bloqueados. Na Figura 3.4 supõe-se que a aquisição da linha já foi solicitada.

O primeiro sinal mostrado é o sinal de saída do CCD, onde se pode observar a tensão correspondente a cada "pixel". Em seguida está o pulso ϕR, na mesma frequência dos "pixels".

O pulso de conversão é gerado a partir da borda de descida do ϕR e tem sua duração ajustável através da variação de um potenciômetro.

É interessante isto acontecer porque assim pode-se escolher a exata região do sinal do "pixel" para iniciar a conversão, bem como evitar regiões ruidosas.

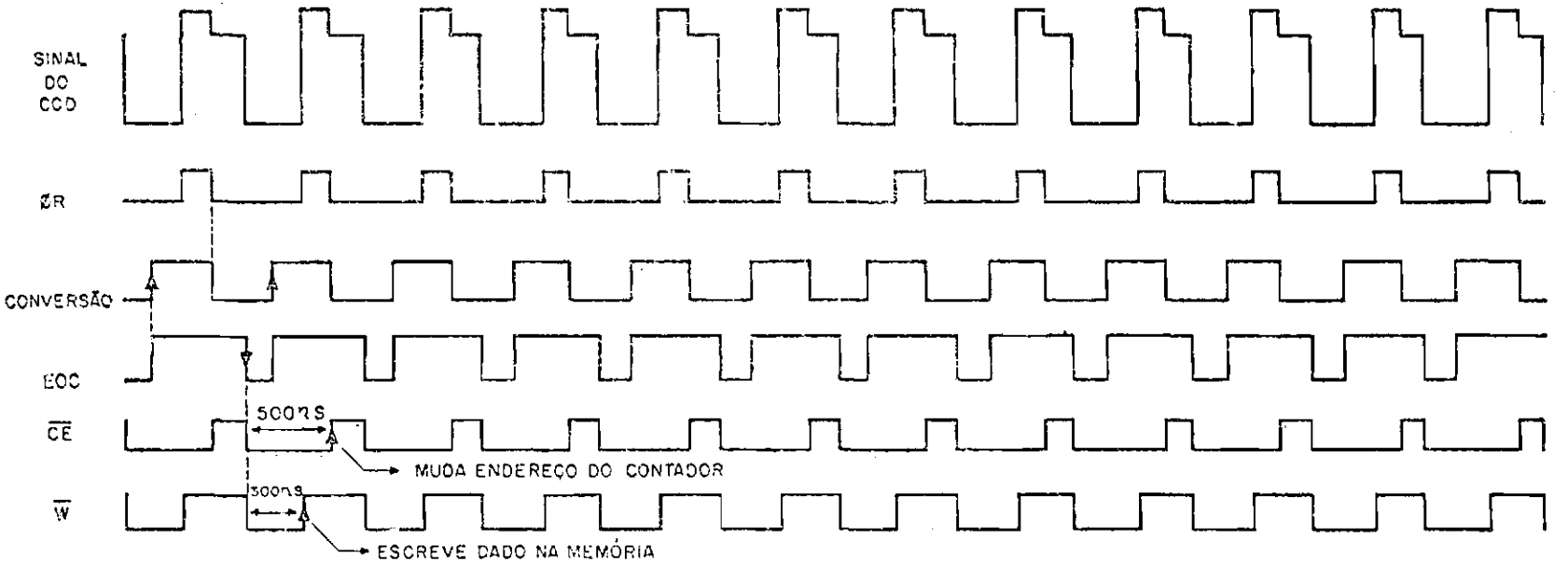


Fig. 3.4 - Diagrama de tempo para escrita de dados na memória intermediária.

O conversor A/D inicia a sua atividade na subida do pulso de conversão e, imediatamente, o sinal de fim de conversão EOC (End of Conversion) que estava baixo passa para alto para indicar o que está ocorrendo.

O conversor A/D trabalha com doze bits; quando o último bit está pronto o sinal EOC retorna ao nível baixo, que indica o fim de conversão. Agora que o dado está pronto ele deve ser armazenado na memória intermediária. A transição alto para baixo do sinal EOC gera, através de dois monoestáveis, os pulsos $\overline{CE}$ e $\overline{W}$. O pulso $\overline{CE}$, quando baixo, mantém a memória selecionada enquanto o pulso $\overline{W}$ escreve os dados.

O endereço para a memoria vem do contador de endereços que está na placa de controle, o qual é incrementado pela borda de subida do pulso $\overline{CE}$, preparando o endereço para o armazenamento do próximo dado.

Assim este processo continua guardando o sinal de todos os elementos do CCD até ser interrompido pela chegada do pulso EOL (fim de linha) do CCD.

3.2.2 - LEITURA DE DADOS DA MEMÓRIA INTERMEDIÁRIA

O controle da memória intermediária é feito de tal modo que normalmente ela fica acessível apenas para leitura. Como foi explicado na seção anterior, só é possível escrever nela quando o microcomputador solicita a aquisição de dados através do envio de sinais de controle. Portanto, o sinal $\overline{W}$ fica normalmente no estado alto.

Quanto ao sinal $\overline{CE}$ que, durante a escrita na memória, era gerado a partir do ϕR para ser sincronizado com os "pixels" do CCD, agora é gerado a partir de um pulso de leitura enviado pelo microcomputador. Esse pulso gera o $\overline{CE}$ através de um monoestável e a sua duração deve ser ajustada de modo a dar tempo para que o computador leia o dado antes do seu término (o pulso chama-se PCTL).

A transição de subida de $\overline{CE}$ também incrementa o contador de endereços, preparando-o para a leitura do próximo dado (Figura 3.5).

Utilizando ciclos de escrita na memória intermediária e leitura pelo computador, podem-se adquirir dados do CCD para a memória interna do computador, fazer cálculos, guardá-los em disco, etc.

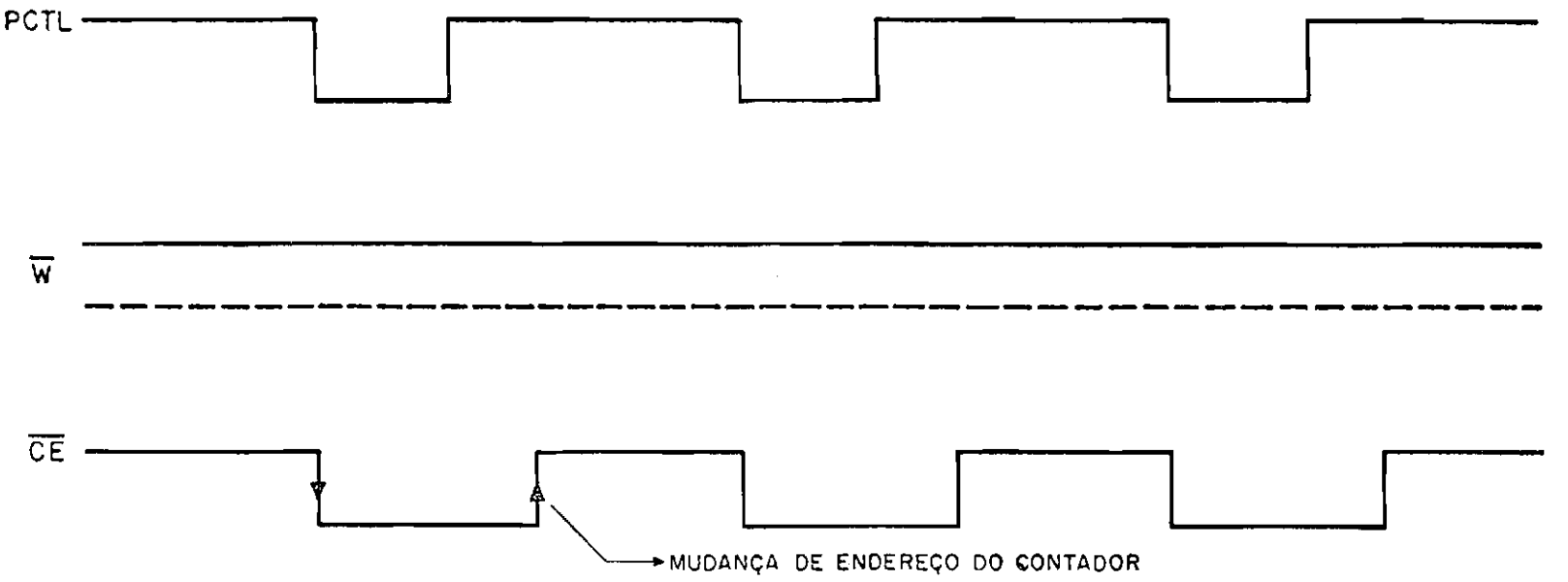


Fig. 3.5 - Diagrama de tempo para leitura de dados da memória intermediária.

CAPÍTULO 4

DETALHAMENTO DA ELETRÔNICA

No capítulo anterior estudou-se o diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados e analisaram-se as funções efetuadas por cada bloco. Neste capítulo serão estudados os detalhes de construção da eletrônica, bem como as características dos componentes utilizados.

4.1 - INTERFACE

Na Figura 4.1 apresenta-se o diagrama eletrônico da interface microcomputador-sistema. Esta placa é colocada no conector nº 3 do microcomputador. Os micros do tipo Apple II acessam os conectores de expansão como se fossem posições de memória, e cada conector pode ser acessado por dezesseis endereços de memória diferentes. Quanto ao conector nº 3 que está sendo usado, qualquer endereço na faixa de 49.328 a 49.343 (em decimal) faz referência a ele.

Quando se acessa qualquer um dos endereços citados, o pino $\overline{DS}$ recebe um pulso. Usando o pulso $\overline{DS}$ e decodificando os quatro bits de endereço que chegam ao conector, podem-se produzir dezesseis pulsos de controle diferentes. No caso da interface micro-sistema, utilizaram-se apenas três bits de endereço porque foram necessários apenas oito sinais de controle.

No lado esquerdo da Figura 4.1 aparecem os sinais retirados do conector do micro e no lado direito aparecem os sinais enviados para o sistema de aquisição de dados.

Os dois integrados 74LS244 são dispositivos "tristate" que funcionam como isoladores para o barramento de dados. Quando não estão selecionados, estes dispositivos apresentam a sua saída em um estado de alta impedância; quando estão selecionados, permitem a passagem de dados sem alteração.

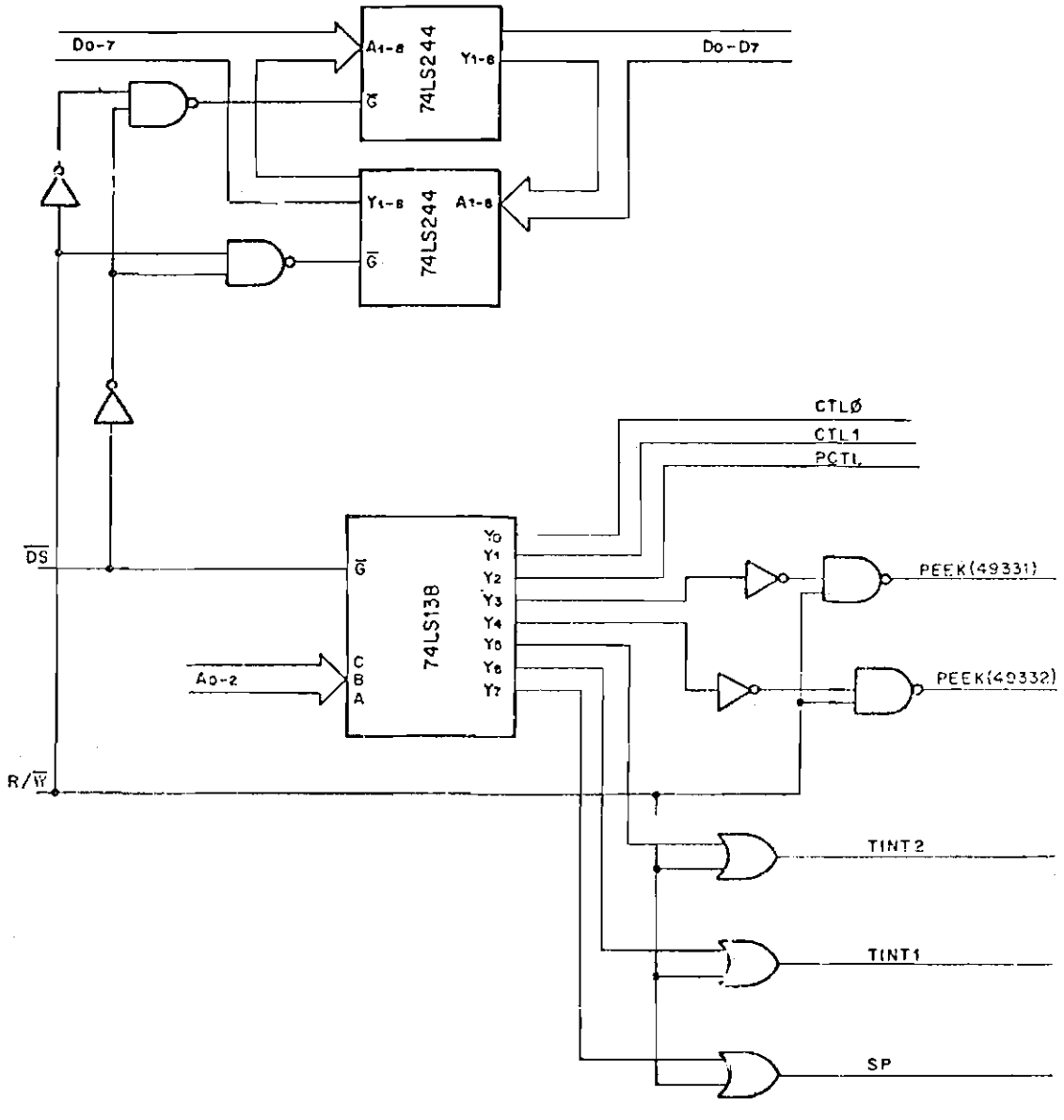


Fig. 4.1 - Circuito da interface microcomputador-sistema.

Como o barramento de dados é bidirecional, são necessários dois 74LS244, ligando-se um quando o computador vai enviar um dado para o sistema e outro quando o computador vai receber um dado do sistema. Deste modo permite-se que o barramento seja ligado em apenas um sentido de cada vez. A decisão de quando e qual dos "tristates" vai ser ligado é feita por combinações lógicas dos sinais $\overline{DS}$ e R/$\overline{W}$ que atuam na entrada de controle.

O integrado 74LS138 é um demultiplexador que liga o pulso $\overline{DS}$ em uma das oito saídas, de acordo com os três bits de endereço. Na saída do demultiplexador, como se vê na Figura 4.1, ainda se faz para alguns sinais uma combinação em R/$\overline{W}$, dependendo se o pulso é usado para escrever ou para ler algum dado.

Além dos 8 bits de dados, enviam-se para o sistema os oito pulsos de controle, que são:

- CTLϕ, CTL1 e PCTL: utilizados na placa de controle;
- PEEK (49331), PEEK (49332) e SP: utilizados na placa do seletor de "pixels";
- TINT1 e TINT2: utilizados na placa de acionamento do CCD.

A função de cada um destes pulsos será explicada na descrição da placa correspondente.

Os componentes utilizados nesta placa são:

- 2 "tristates" - 74LS244;
- 1 demultiplexador - 74LS138;
- Portas lógicas:
  - . Inversor (74LS04),
  - . "NE" (74LS00),
  - . "OU" (74LS32).

4.2 - CIRCUITO DE ACIONAMENTO DO CCD

Esta placa tem a função de gerar as formas de onda mostradas na Figura 3.3. Ela está localizada no módulo que contém a eletrônica do sistema, o qual é denominado núcleo do sistema.

Normalmente os próprios fabricantes de CCDs fornecem um circuito de acionamento sugerido para o seu funcionamento. O circuito utilizado nesta placa é baseado nessa sugestão.

Todas as formas de onda são geradas a partir de uma frequência piloto produzida por um gerador externo de onda quadrada de frequência ajustável.

Observando a Figura 4.2 (circuito) e a Figura 4.3 (formas de onda), pode-se compreender o funcionamento do circuito de acionamento do CCD.

A frequência piloto do gerador de onda quadrada é entrada para o relógio ("clock") do "flip-flop" número 1, que produz nas suas saídas 1Q e $1\overline{Q}$ formas de onda com metade da frequência da entrada.

A saída $1\overline{Q}$ é combinada logicamente com o relógio de entrada através de uma porta "E", o que produz o pulso ϕR do CCD que pode ser visto no diagrama.

O sinal da saída 1Q tem a sua frequência novamente dividida por dois pelo "flip-flop" número 2. Na saída $2\overline{Q}$ já se tem um sinal, que é o próprio pulso ϕT do CCD.

O sinal de saída $1\overline{Q}$ tem também a sua frequência dividida por dois no "flip-flop" número 3, o que dá origem na saída 3Q a um sinal de mesma frequência que ϕT, porém de fase diferente. Este sinal é utilizado como relógio para o contador que determina o aparecimento do pulso ϕX.

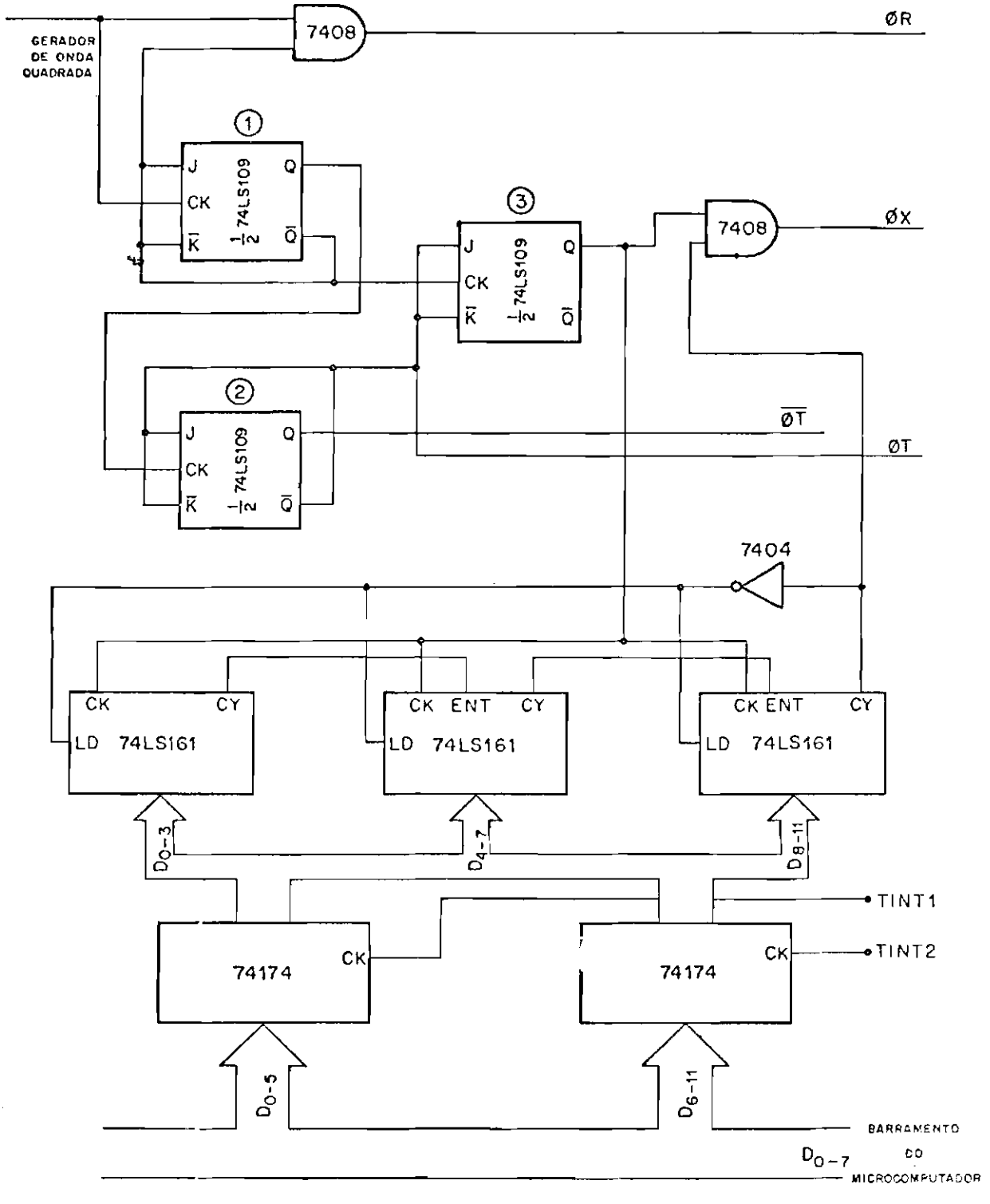


Fig. 4.2 - Circuito de acionamento do CCD.

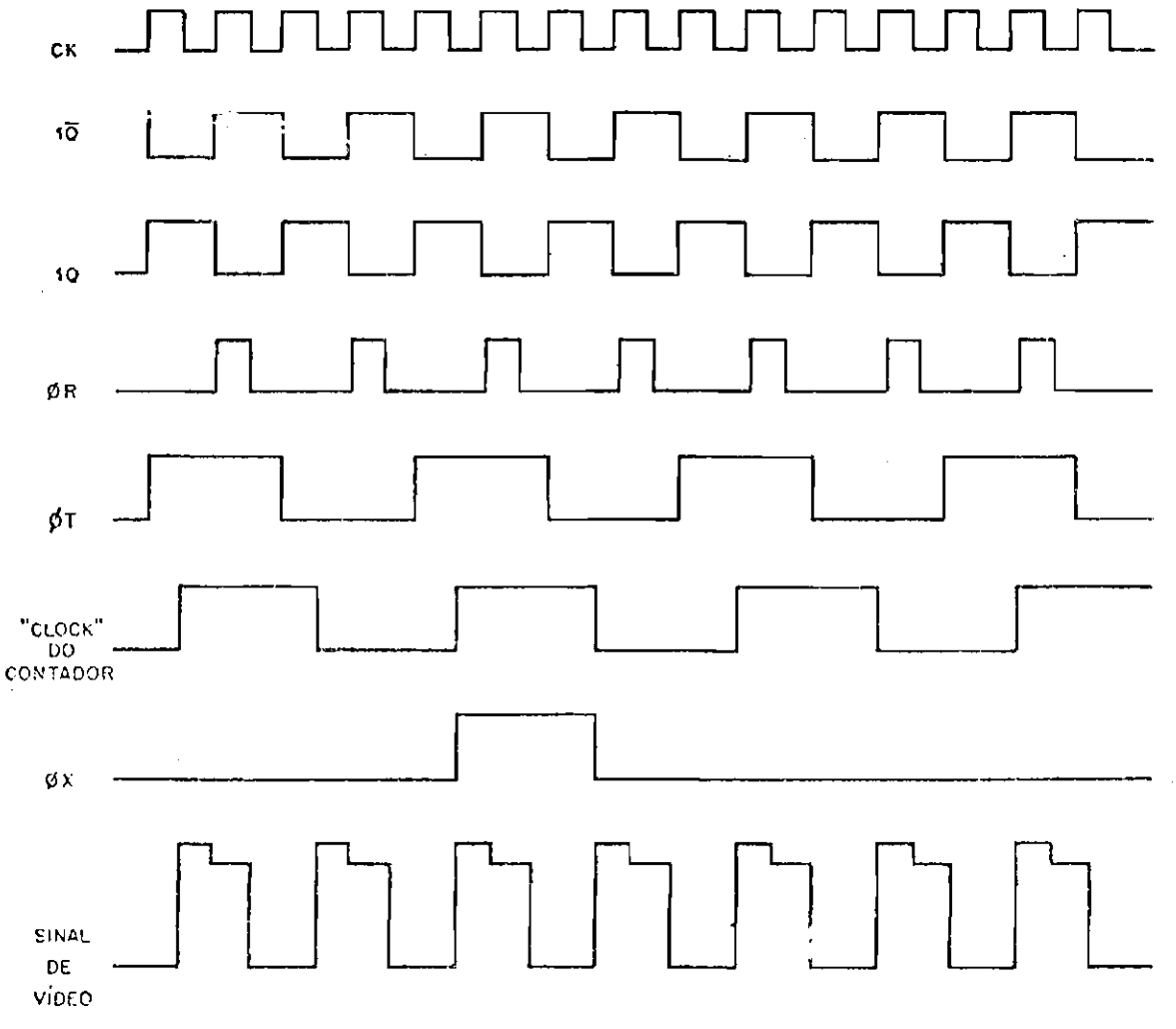


Fig. 4.3 - Formas de onda do circuito de acionamento.

Como se viu no Capítulo 3, é o intervalo entre os pulsos de ϕX que determina o tempo de integração para o CCD. Existem várias maneiras de controlar o tempo de integração.

Aqui escolheu-se uma que permite grande precisão de controle desse tempo, bem como facilidade de comando via microcomputador.

O pulso ϕX é gerado toda a vez que o contador formado pelos três integrados 74LS161 libera o pulso de "carry". Isto ocorre sempre que o contador atinge a contagem máxima.

A extensão total da contagem é determinada pelo valor inicial carregado no contador, o qual é mandado pelo microcomputador. Este dado é armazenado no integrado 74174 ("latch") e fica colocado nas entradas do contador até que um novo dado seja enviado.

Na verdade, o dado que determina a contagem é carregado pelo computador em duas etapas, onde são mandados seis bits de cada vez.

Não podem ser enviados os doze bits simultaneamente porque o barramento do computador possui apenas oito bits.

Na Figura 4.2 observa-se que aparecem dois sinais: TINT1 e TINT2. A geração destes sinais já foi explicada na descrição da placa de interface (Seção 4.1). Eles são utilizados para carregar os dados que vão alterar o tempo de integração no registro formado pelos integrados 74174. Quando o computador coloca os dados no barramento, ele aciona estes sinais, o que permite que eles sejam armazenados.

O método de controle do tempo de integração descrito acima possui duas vantagens: facilidade de controle pelo microcomputador e precisão.

O local de armazenamento do dado de controle é tratado como uma posição de memória e possui endereço, sendo necessárias apenas operações de escrita na memória para alterar o tempo de integração.

O "clock" do contador é uma forma de onda com a mesma frequência de ϕT; portanto, a precisão de controle do tempo de integração é de um período de ϕT, isto é, para uma frequência de 250KHz para o ϕT pode-se controlar o tempo de integração em passos de 4μs.

Todos os sinais gerados nesta placa estão em níveis TTL (0 e 5V) e são enviados para a placa do CCD.

Os componentes utilizados nesta placa são:

- 2 "flip-flops" - 74LS109;
- 2 contadores - 74LS161;
- 2 "latches" - 74174;
- portas lógicas:
  . inversor (74LS04),
  . "E" (7408).

4.3 - CONVERSOR ANALÓGICO/DIGITAL (A/D)

O conversor A/D transforma o sinal analógico do CCD em dados utilizáveis pelo microcomputador.

Pode-se observar o esquema do conversor A/D na Figura 4.4. Ele é formado por duas partes principais, um circuito amostrador/segurador e um circuito integrado conversor analógico digital.

O circuito amostrador/segurador ("sample and hold") é um circuito híbrido e serve para segurar e manter constante o sinal que está sendo convertido no circuito integrado conversor A/D.

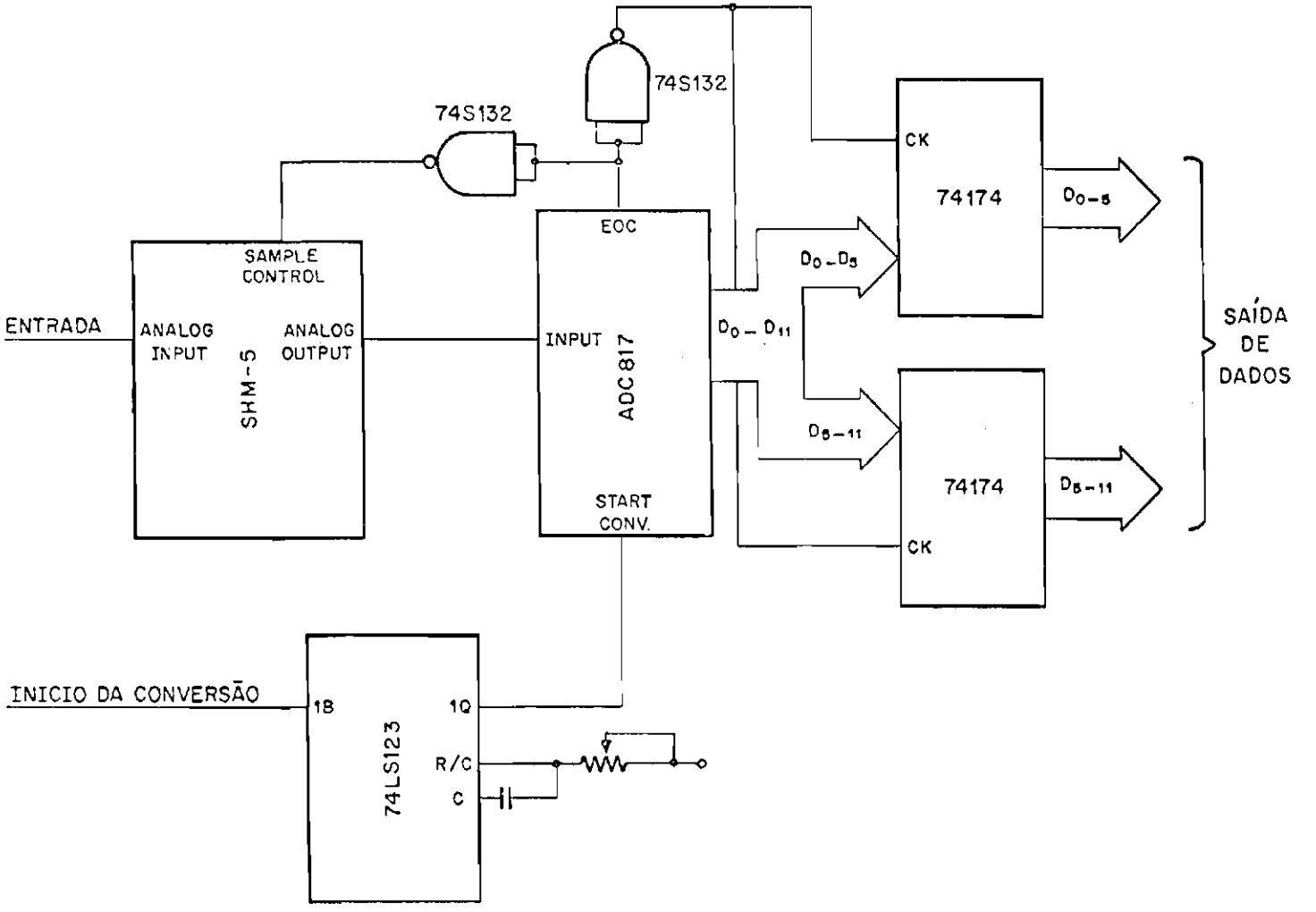


Fig. 4.4 - Conversor A/D.

Ele trabalha em dois modos; no modo amostragem apenas segue o sinal que chega à sua entrada. No instante em que recebe um sinal, passa para o modo retenção, segurando o sinal até que o conversor A/D termine a conversão.

O conversor A/D é um circuito integrado que realiza a função básica do circuito, ou seja, a própria conversão. Ele recebe o sinal para iniciar uma conversão e imediatamente o sinal EOC ("end of conversion") vai para o nível alto até que ela acabe. Este sinal EOC é utilizado para comandar o circuito amostrador segurador, fazendo-o segurar o sinal ou liberando-o de acordo com o estado do conversor A/D.

O sinal de início de conversão passa através de um circuito monoestável; assim, a largura do pulso que vai acionar o conversor A/D pode ser ajustada.

Uma vez efetuada uma conversão, os dados ficam disponíveis na saída do conversor até que uma nova conversão seja iniciada. Para que os dados fiquem disponíveis por um maior período de tempo, ou seja, até que uma nova conversão seja terminada, adicionaram-se dois circuitos "latch" que os mantêm estáveis na sua saída. O sinal EOC também provoca o carregamento dos dados nas "latches".

Para evitar ruído e, consequentemente, erros de conversão, esta placa foi montada utilizando algumas técnicas de baixo ruído, como por exemplo separação dos terras digital e analógico, utilização de plano terra e blindagem.

Os componentes utilizados nesta placa são:

- Conversor A/D:
  - . ADC 817 Datel Intersil;
  - . tempo de conversão: 2μs;
  - . resolução: 12 bits.

- 2 circuitos "latch" - 74174;
- 1 monoestável - 74LS123;
- porta lógica "schmidt trigger" - 74S132.

4.4 - MEMÓRIA INTERMEDIÁRIA

A memória intermediária é um local de armazenamento temporário dos dados para o intervalo entre a conversão A/D e a leitura pelo microcomputador.

O sinal do CCD foi digitalizado para uma forma digital de 12 bits; portanto, necessita-se de uma memória que guarde palavras de 12 bits.

O número de posições de memória deve ser pelo menos igual ao número de elementos sensores do CCD. Este sistema foi concebido para caracterizar o CCD 122 da Fairchild que tem 1728 elementos e necessita, portanto, de uma memória de aproximadamente 2K. No entanto, prevendo, uma futura utilização para caracterização de CCDs de maior porte, montou-se uma memória com 4K palavras de 12 bits.

São utilizados para montar a memória doze circuitos integrados de 4K bits cada um. O esquema é mostrado na Figura 4.5. No armazenamento de uma palavra, cada circuito integrado fica com um único bit.

Os bits de endereço (A0-11) e os sinais de escrita ($\overline{W}$) e de seleção ($\overline{CE}$) são gerados na placa do circuito de controle sob comando do microcomputador ou do conversor A/D, dependendo se está havendo escrita ou leitura na memória.

A memória utilizada é a 2141L-5 da INTEL, que possui um tempo de acesso de 250ns.

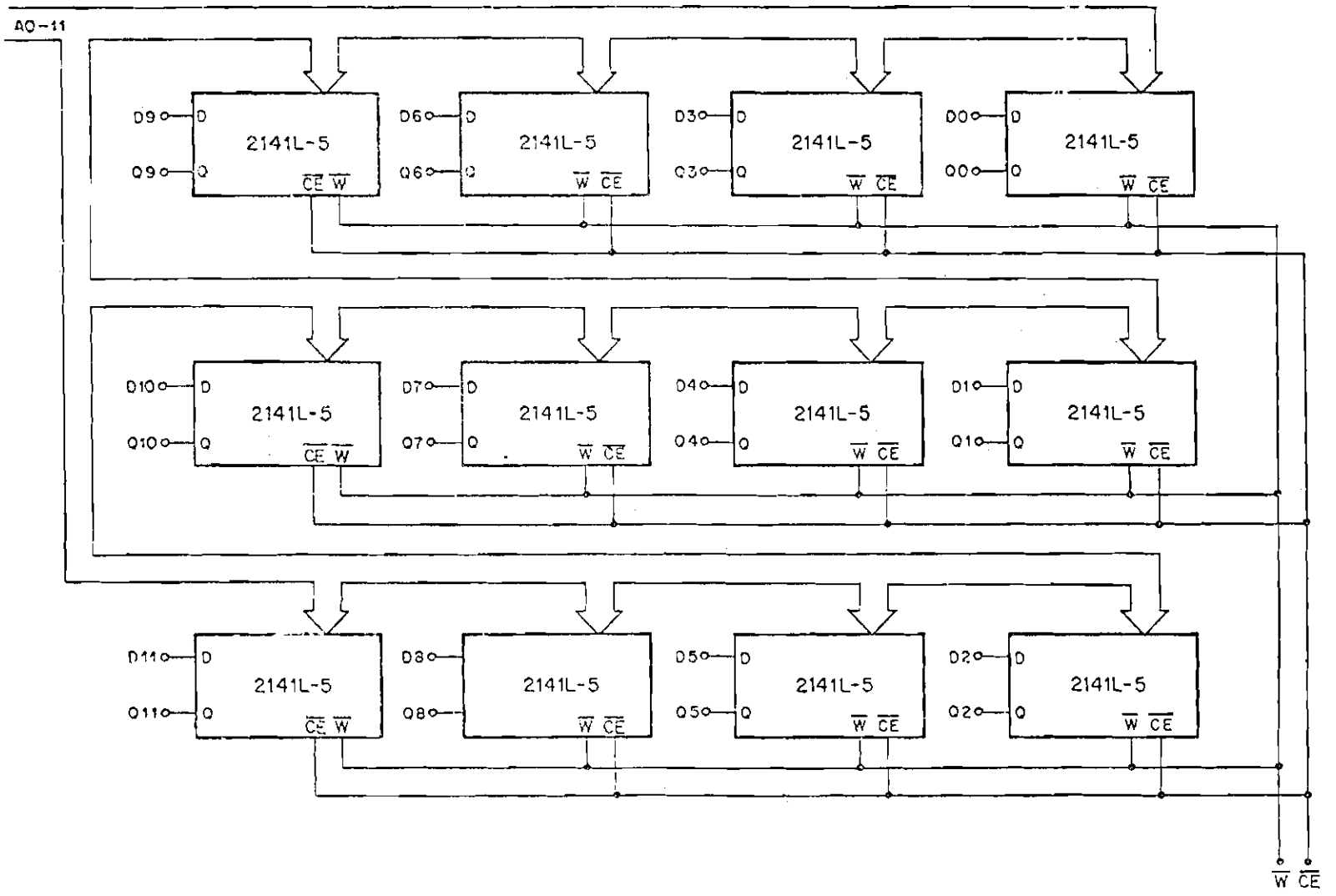


Fig. 4.5 - Memória intermediária.

4.5 - CIRCUITO DE CONTROLE E ENDEREÇAMENTO

Este circuito tem uma função fundamental para o bom funcionamento do sistema. É ele que permite a sincronização de todos os sinais para a aquisição dos dados no momento correto.

A Figura 4.6 apresenta de forma esquemática o circuito de controle e endereçamento, onde se pode observar o contador de endereços utilizado para endereçar a memória intermediária.

A aquisição de uma linha do CCD só poderá ser efetuada com a chegada do pulso de início de linha (ϕX), desde que a saída 1Q do "flip-flop" 74LS74 esteja no estado alto (H).

Portanto, enquanto a saída 1Q estiver no nível baixo não serão permitidas aquisições de linhas. Para permitir a aquisição de uma linha existem dois pulsos que são enviados pelo microcomputador: CTL1 e CTLØ. Para preparar a aquisição da linha é enviado o pulso CTL1, que garante que a entrada 1CK do "flip-flop" estará no nível baixo (L). Em seguida, para o início efetivo da aquisição de linha, é enviado o pulso CTLØ, que leva o sinal na entrada 1CK para alto, deslocando o nível alto da entrada D1 para a saída 1Q. Como foi explicado acima, isto permite que o pulso ϕX inicie a aquisição através da mudança do sinal na saída 2Q para alto. Esta mudança tem dois efeitos: gera um pulso de "clear", que zera o contador de endereços através do monoestável 74LS123 e leva a entrada de controle S dos dois multiplexadores 74LS157 para alto. O sinal S no nível alto liga à saída dos multiplexadores os sinais $\overline{W}$ de escrita na memória e $\overline{CE}$ de seleção na memória.

Os pulsos de controle são gerados através de dois monoestáveis (74LS123) a partir do sinal de fim de conversão do conversor A/D (EOC).

O próprio sinal de seleção da memória ($\overline{CE}$) incrementa o contador de endereços após cada escrita de um dado.

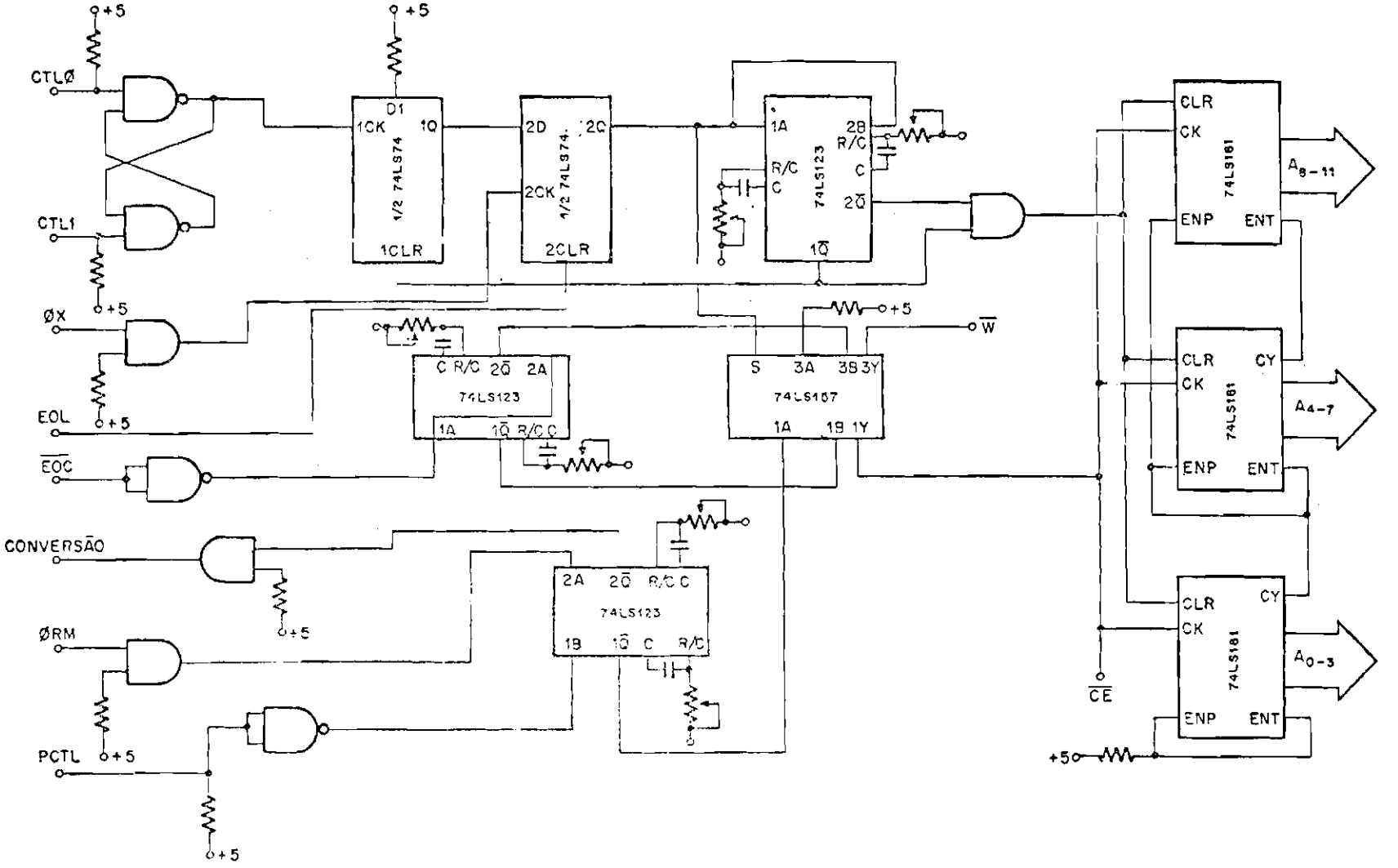


Fig. 4.6 - Circuito de controle e endereçamento.

O pulso de conversão, obtido com outro monoestável a partir do pulso ϕR, também é fornecido por este circuito. O instante de subida deste pulso pode ser ajustado, o que permite que o "pixel" seja digitalizado em um ponto onde não haja ruído de "reset".

Uma vez adquirida toda a linha aparece o pulso EOL (fim de linha), que, através da entrada 2CLR ("clear" 74LS74), leva a saída 2Q novamente para o nível baixo. A descida do sinal da saída 2Q gera, através de um monoestável (74LS123), um pulso de "clear" que zera novamente o contador de endereçamento e leva a saída 1Q (74LS74) para o nível baixo, o que impede que o pulso ϕX inicie nova aquisição de linha.

A descida para o nível baixo da saída 2Q também leva a entrada S de controle dos multiplexadores (74LS157) para o nível baixo. Com o controle S no nível baixo, é ligada à saída 3y (sinal $\overline{W}$) a entrada 3A (+5 volts) e à saída 1y (sinal $\overline{CE}$) a entrada 1A. Esta entrada é a saída de um monoestável (74LS123) cujo pulso é gerado a partir de um outro pulso denominado PCTL. Com o sinal $\overline{W}$ em nível alto, a memória intermediária está permanentemente selecionada apenas para leitura. O pulso PCTL, do mesmo modo que CTLϕ e CTL1, é um pulso enviado pelo microcomputador, utilizado quando se deseja ler a memória intermediária. Deste modo permite-se que a memória intermediária seja lida simplesmente enviando pulsos PCTL e lendo o dado no endereço em que ele está, o que será melhor entendido quando for explicado o circuito do seletor de "pixels" e interface.

Novamente o sinal $\overline{CE}$ produzido a partir do pulso PCTL também é utilizado para incrementar o contador de endereçamento.

Este estado de coisas permanece até que uma nova linha venha a ser adquirida através do envio dos pulsos CTLϕ e CTL1.

Os componentes utilizados neste circuito são:

- 1 "flip-flop" do tipo D - 74LS74;
- 3 monoestáveis - 74LS123;

- 1 multiplexador - 74LS157;
- 3 contadores - 74LS161;
- portas "E" - 74LS08;
- portas "NE" - 74LS00.

4.6 - CIRCUITO SELETOR DE "PIXELS"

O circuito seletor de "pixels" possui duas funções distintas: a primeira é selecionar os "pixels" que serão digitalizados e a outra é dar passagem aos dados armazenados na memória intermediária quando esta estiver sendo lida pelo microcomputador Estas funções podem ser facilmente percebidas no esquema do circuito apresentado na Figura 4.7.

Como foi citado anteriormente, a memória intermediária armazena os dados digitalizados em 12 bits e o barramento de dados do microcomputador possui apenas oito bits que permitem, portanto, a leitura simultânea de somente oito bits. Na parte superior da Figura 4.7 observam-se dois circuitos integrados 74LS244 que têm ligados às suas entradas as saídas da memória intermediária. Ao primeiro estão ligados quatro bits e ao segundo estão ligados oito bits. Estes circuitos integrados são dispositivos "tristate" que, quando estão selecionados, permitem a livre passagem dos dados para as suas saídas; quando não estão, deixam as saídas em um estado de alta impedância para não interferir no barramento de dados.

Selecionando um ou outro dispositivo, podem-se ler ora os quatro bits menos significativos dos dados, ora os oito bits mais significativos. Observam-se nos pinos de seleção dos dispositivos as inscrições PEEK (49331) e PEEK (49332), que são os próprios comandos na linguagem BASIC utilizados para a leitura dos dados. Quando se deseja ler, por exemplo, os quatros bits menos significativos, o computador executa o comando PEEK (49331), que envia um pulso ao endereço 49331 (pino do dispositivo) e lê os bits que são colocados no barramento.

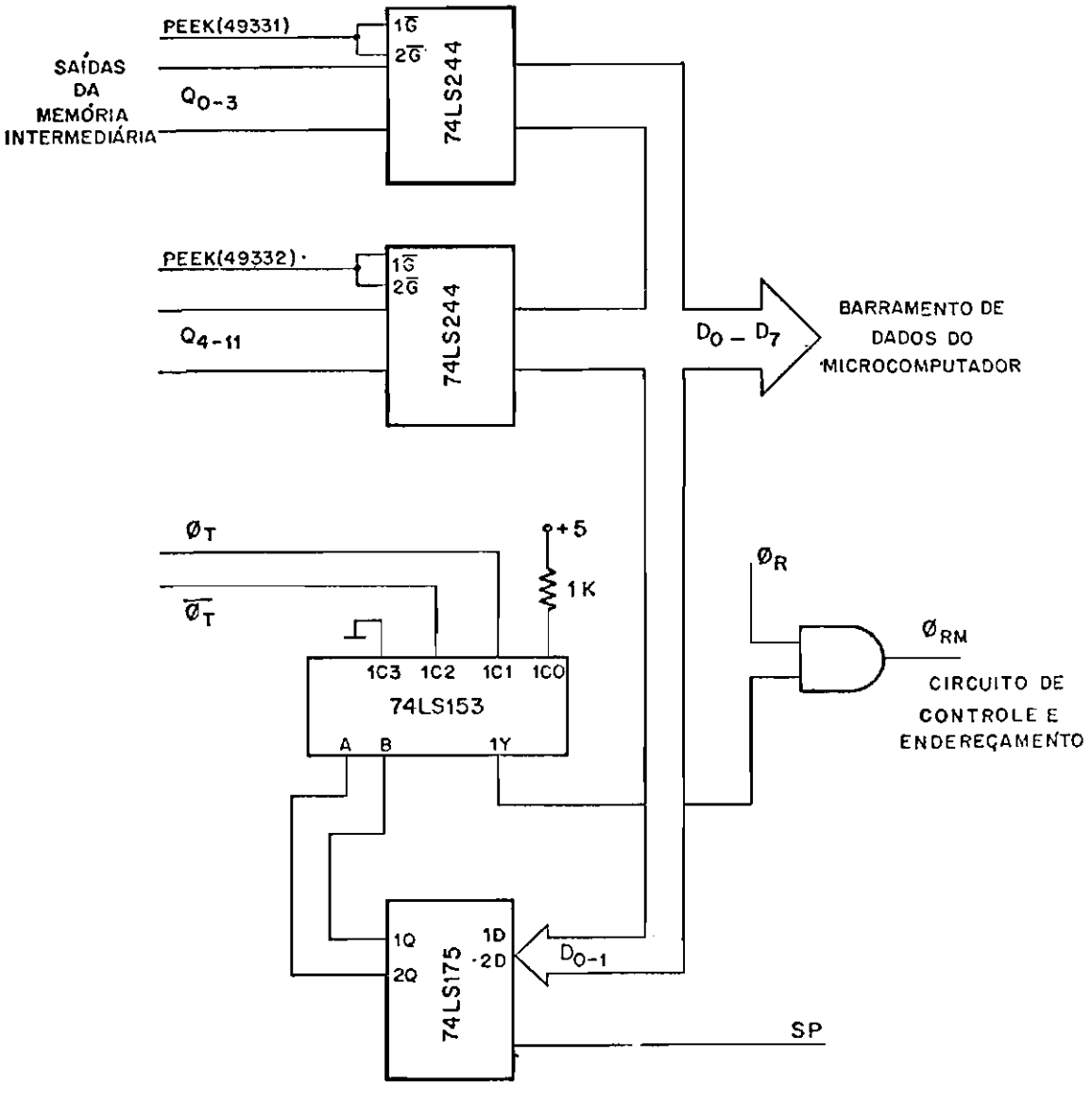


Fig. 4.7 - Circuito seletor de "pixels".

Na parte inferior da Figura 4.7 apresenta-se o circuito seletor de "pixels". Os pulsos de conversão para o conversor A/D são gerados a partir do pulso ϕR; portanto, controlando a passagem do pulso ϕR podem-se selecionar os "pixels" a serem digitalizados.

Como foi explicado no Capítulo 3, têm-se quatro possibilidades para digitalização dos "pixels": todos os "pixels", os "pixels" pares, os "pixels" ímpares, nenhum "pixel".

O controle da passagem dos pulsos ϕR é efetuado fazendo uma combinação em uma porta lógica "E" do pulso ϕR com algum outro sinal. Esse sinal é levado até a entrada da porta "E" por um circuito multiplexador (74LS153) que liga um dos quatro sinais à sua saída. Quando o multiplexador liga à sua saída um nível alto (5 volts), a porta lógica "E" permite a passagem de todos os pulsos de ϕR; consequentemente, todos os "pixels" são digitalizados. Se o multiplexador liga o pulso ϕT ou $\overline{\phi T}$ (ϕT invertido), é permitida a passagem de pulsos pares ou ímpares do ϕT. Finalmente, se é ligado o nível baixo (0 volts), não é permitida a passagem de nenhum pulso de ϕR; portanto, nenhum "pixel" será digitalizado.

A decisão de qual sinal é ligado à saída do multiplexador é dada pelas suas entradas A e B, as quais por sua vez são saídas de um circuito "latch" (74LS175).

O circuito "latch" é carregado pelo microcomputador, sob o controle do software, colocando o dado correspondente no barramento de dados e acionando o pulso SP (seleção de "pixels").

Os dados carregados são os seguintes:

- 0: pega todos os "pixels";
- 1: pega os "pixels" ímpares;
- 2: pega os "pixels" pares;
- 3: não pega nenhum "pixel".

Os componentes utilizados neste circuito são:

- 2 dispositivos "tristate" - 74LS244;
- 1 multiplexador - 74LS153;
- 1 circuito "latch" - 74LS175;
- porta "E" - 74LS08.

4.7 - PLACA DO CCD

Esta é a placa onde é colocado o CCD a ser analisado. O circuito esquemático pode ser observado na Figura 4.8.

Os pulsos ϕT, ϕR e ϕX, responsáveis pelo deslocamento das cargas no interior do CCD e gerados no circuito de acionamento do CCD, passam através dos integrados 9643, que são "drivers" TTL/MOS. O "driver" TTL/MOS converte as formas de onda que chegam até ele de TTL (níveis 0 e 5v) em MOS (níveis 0,3 e 10v), níveis que são necessários para o funcionamento dentro das especificações do fabricante do CCD.

Na parte inferior da Figura 4.8 aparece o circuito gerador de tensões de referência, que produz uma série de tensões utilizadas como referência para funções internas do CCD. Este circuito, embora não esteja mostrado explicitamente, é bastante simples, sendo formado por um regulador de tensão LM723 e por alguns capacitores e resistores que atuam como divisores de tensão. Existem ainda os reguladores 7812 e 7912, utilizados para fazer a alimentação propriamente dita do CCD e de alguns outros componentes da placa, como transistores e amplificadores operacionais.

A saída de vídeo do CCD, que é o sinal que se tem interesse em analisar, está identificada pela sigla OS. Ela passa através de um certo processamento inicial antes de ser enviada ao conversor A/D.

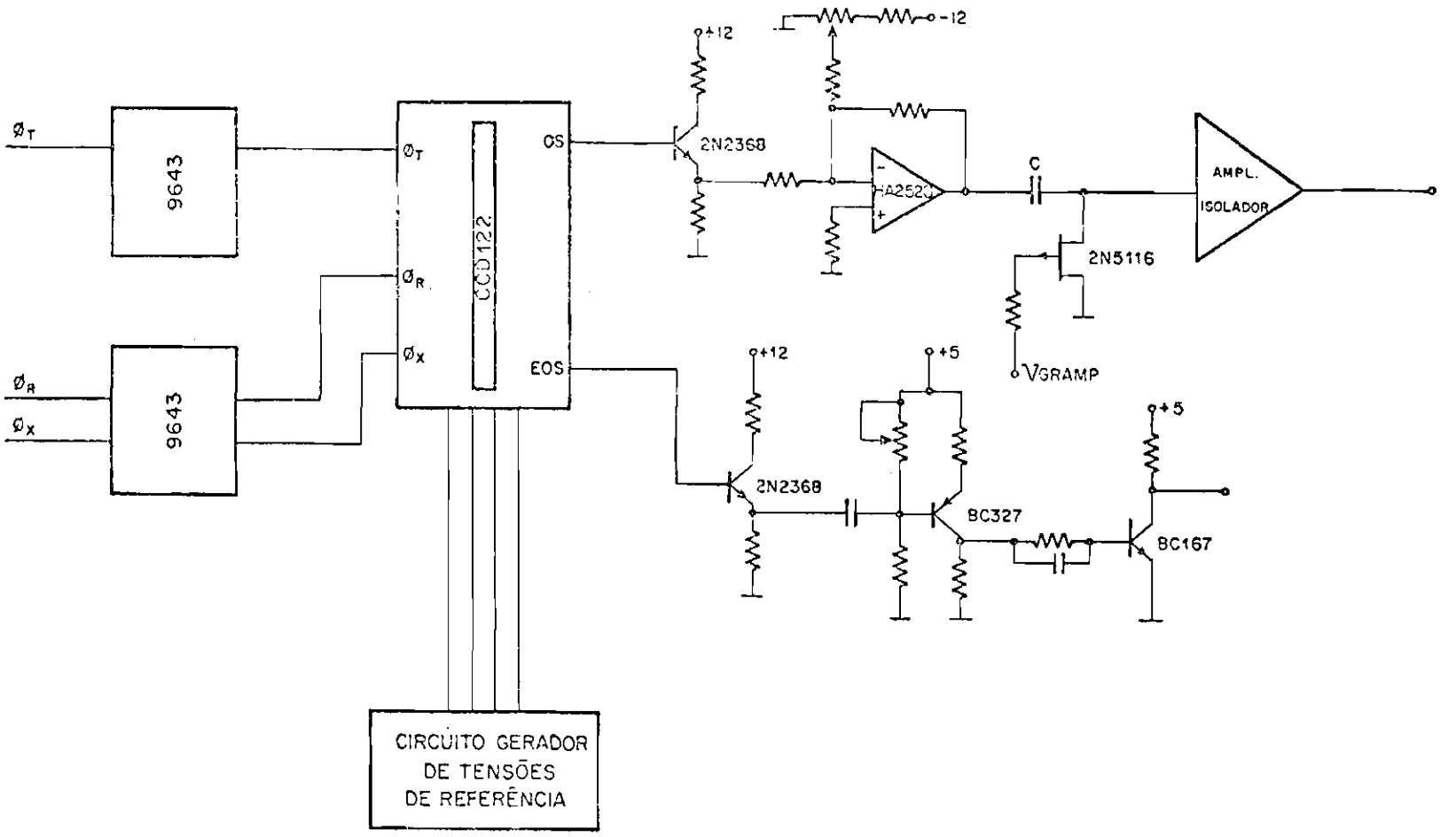


Fig. 4.8 - Circuito do CCD, "drivers" e amplificadores.

Inicialmente ele passa através de um circuito seguidor de emissor formado pelo transistor 2N2368.

Isto serve para isolar a saída do CCD, impedindo que ela venha a ser carregada pelos circuitos subsequentes. O sinal de vídeo passa então através de um pré-amplificador formado pelo amplificador operacional HA2520, onde recebe um ganho inicial e onde é retirado o nível DC que apresentava o sinal. Logo após, o sinal passa através de um circuito de grampeamento. Como se viu na Seção 3.1.8, o nível DC da saída de vídeo do CCD varia com a temperatura e também de dispositivo para dispositivo. Portanto, para que se tenha uma medida confiável é necessário um grampeamento do nível de referência em zero volts, como indicado na Figura 4.9.

O circuito de grampeamento é baseado em um capacitor e em uma chave que, neste caso, é um transistor de efeito de campo (2N5116). A alta impedância do amplificador isolador impede que o capacitor se descarregue, o que permite o funcionamento correto do circuito de grampeamento.

Na Figura 4.9 também pode ser observada a tensão aplicada para o fechamento da chave (2N5116), que é V_{GRAMP}.

A chave é fechada no momento que se tem na saída a tensão de referência V_{REF}, que é a referência de zero para o sinal de vídeo.

O terminal do capacitor C é assim ligado ao terra através da chave fechada, o que permite o armazenamento de V_{REF} no capacitor.

Em seguida a chave é aberta e o capacitor não pode mais se descarregar, mantendo armazenada a tensão V_{REF}. Quando o sinal de vídeo passa sobre o capacitor, a tensão armazenada é subtraída do sinal por causa da polaridade com que ela foi armazenada; como resultado disto o nível de referência passa a ser zero volts.

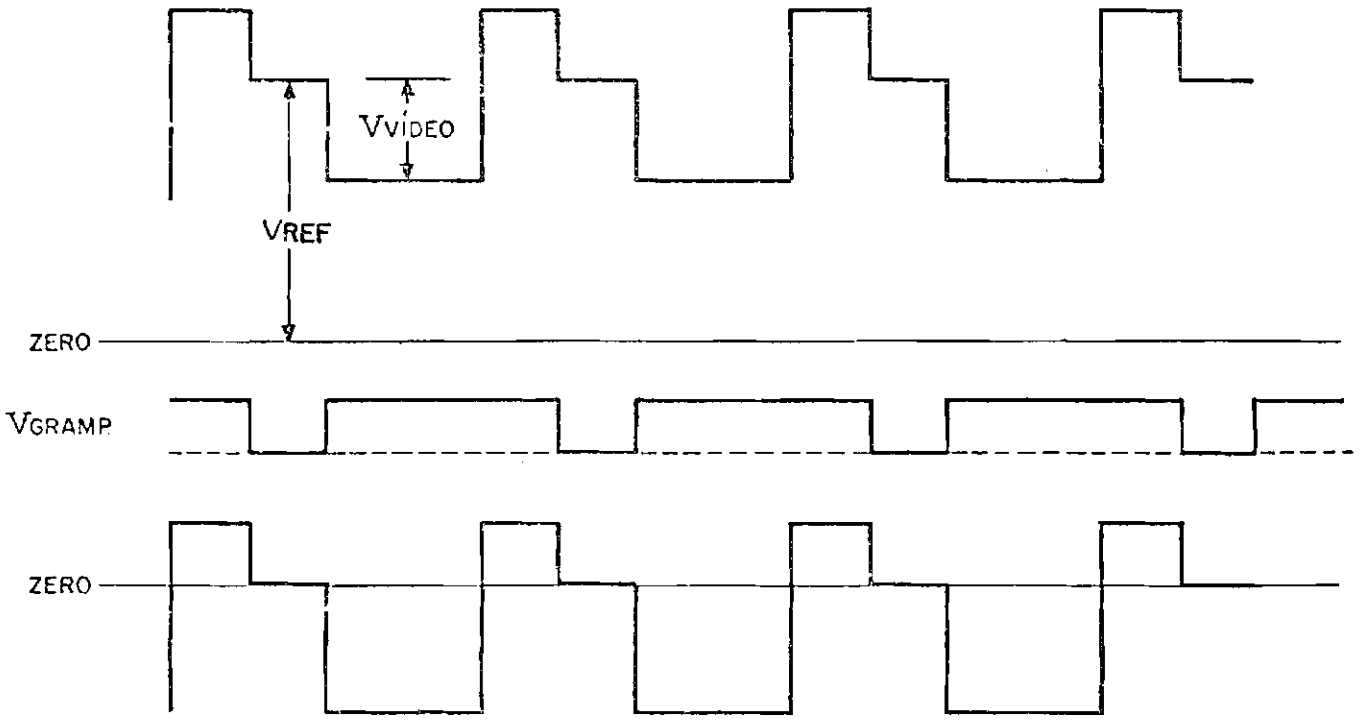


Fig. 4.9 - Grampeamento do sinal de vídeo do CCD.

Na passagem do sinal do próximo "pixel", o processo é novamente repetido. A tensão de grampeamento V_{GRAMP} (tensão que liga a chave) é produzida por um circuito monoestável a partir do pulso ϕR de "reset" do CCD.

A amplificador isolador possui a entrada formada por um par casado de transistores de efeito de campo (2N5196); portanto, tem impedância de entrada muito alta. O circuito é formado ainda por dois amplificadores operacionais, que dão um ganho adicional ao sinal de vídeo e deixam o sinal compatível com os níveis de tensão da entrada do conversor A/D.

A outra saída do CCD é a saída de fim de linha EOS (End of Scan), que nada mais é do que um pulso que informa que a varredura de uma linha completa chegou ao fim.

À saída do sinal EOS também é utilizado um transistor 2N2368 como seguidor de emissor. Em seguida é colocado um capacitor para retirar o nível DC. O circuito formado por dois transistores BC327 e BC167 elimina os outros sinais que vêm junto com o EOS (o que pode ser visto na Figura 3.3), deixando passar apenas o pulso de fim de linha com níveis compatíveis TTL.

Os componentes utilizados nesta placa são:

- 2 "drivers" TTL/MOS - 9643;
- 3 amplificadores operacionais - HA2520;
- 1 regulador de tensão - LM723;
- 1 regulador de tensão - 7812;
- 1 regulador de tensão - 7912;
- 1 FET - 2N5116;
- 1 par casado FET - 2N5196;

- 2 transistores - 2N2368;
- 1 transistor - BC327;
- 1 transistor - BC167;
- 1 transistor - TIP31;
- resistores;
- capacitores.

4.8 - OBSERVAÇÕES

Como foi descrito no Capítulo 3, excetuadas a placa de interface que está colocada dentro do microcomputador e a placa do CCD que forma um módulo independente, todas as outras estão colocadas num gabinete metálico denominado núcleo do sistema. Todas estas placas são placas padronizadas para colocação em conectores de 22 pinos. O barramento de ligação está localizado na parte posterior do gabinete, fazendo-se entre os pinos dos próprios conectores todas as ligações necessárias para interconexão dos circuitos.

O sistema possui vários ajustes geralmente efetuados através de potenciômetros. Alguns desses ajustes são utilizados apenas na calibração inicial do sistema, não devendo ser mais alterados; outros podem ser mudados de acordo com a utilização do sistema requerida pelo usuário.

Os ajustes que podem ser alterados são:

- *Ajuste dos pulsos* $\overline{CE}$ *e* $\overline{W}$: os pulsos $\overline{CE}$ e $\overline{W}$ de controle da memória intermediária estão ajustados respectivamente em 500ns e 300ns. Estes valores devem-se ao tempo de acesso das memórias utilizadas na construção da memória intermediária (2114iL-5), que é 250ns. Caso as memórias sejam substituídas por memórias mais rápidas ou mais lentas, estes sinais devem ser ajustados.

- *Ajuste do sinal de conversão*: este sinal é utilizado para disparar a conversão no conversor A/D. Ele deve ser ajustado para que a digitalização seja iniciada na região menos ruidosa do "pixel", o que evita o ruído do pulso de "reset". O início da conversão deve ser também ajustado toda a vez que a frequência do pulso ϕR for alterada.

- *Ajuste do pulso PCTL*: este pulso é utilizado pelo microcomputador para selecionar a memória intermediária e efetuar a leitura dos dados. A duração do pulso deve ser suficiente para que dê tempo de o microcomputador ler os dados. Portanto a duração do pulso depende da eficiência do programa ou linguagem utilizados para a leitura dos dados.

Neste capítulo procurou-se analisar de forma resumida todos os circuitos que compõem o sistema de caracterização de CCDs. A análise é suficiente para que se possa entender o funcionamento de cada circuito e o porquê da escolha de cada circuito levando em conta a futura utilização do sistema de caracterização de CCDs.

CAPÍTULO 5

PROGRAMAÇÃO UTILIZADA

Durante as explanações dadas até agora, verificou-se que quase todas as funções realizadas no sistema de caracterização de CCDs são controladas via microcomputador.

O microcomputador necessita de programação para funcionar; portanto, o programador precisa saber quais os comandos que devem ser dados para produzir um determinado pulso de controle, ou para ler um determinado dado. Até agora apenas era citado o nome do sinal produzido pelo micro, mas não qual era o comando que o produzia. Neste capítulo serão apresentados todos os comandos necessários para operar o sistema de caracterização de CCDs.

Para a programação do microcomputador decidiu-se utilizar a linguagem "BASIC" porque possui comandos que facilitam o acesso aos circuitos, é bastante simples de utilizar e possui todas as ferramentas necessárias para o processamento dos dados obtidos. Isto não significa, no entanto, que não se possam utilizar outras linguagens de alto nível, ou então código de máquina. Elas podem apresentar vantagens na rapidez ou na facilidade de programação. No caso do microcomputador utilizado, a linguagem "BASIC" apresenta também a vantagem de ser a linguagem residente no micro, em memória do tipo ROM, não necessitando portanto de nenhum procedimento adicional para carregá-la.

O "BASIC" possui duas instruções de muito interesse para o controle do sistema de caracterização de CCDs. Essas instruções são:

POKE END, D

- Envia o dado D de oito bits para o endereço END.

X = PEEK (END)

- Lê o conteúdo da posição de memória END e atribui esse valor à variável X.

Quando o endereço referido nas duas instruções for um dos endereços correspondentes a um dos conectores de expansão do microcomputador, o pino $\overline{DS}$ do conector receberá um pulso de seleção.

Utilizando estas instruções, podem-se enviar dados para uma interface, ler dados da interface ou enviar pulsos de controle facilmente.

5.1 - SINAIS PARA AQUISIÇÃO DE UMA LINHA

Na seção 4.5 foi explicada a função de dois pulsos necessários para a aquisição de uma linha do CCD, CTL1 e CTLØ.

Após o envio destes pulsos pelo microcomputador na ordem acima, e decorridos apenas alguns milissegundos, a linha está digitalizada e armazenada na memória intermediária.

As instruções necessárias para os pulsos são:

- CTL1: POKE 49329,0;
- CTLØ: POKE 49328,0.

O número do endereço que aparece no comando é proveniente do projeto eletrônico da interface.

5.2 - ESCOLHA DE ELEMENTOS A SEREM DIGITALIZADOS

O circuito seletor de "pixels" apresentado na Seção 4.6 apresenta a possibilidade de selecionar quais são os "pixels" que vão ser digitalizados em uma linha de vídeo do CCD. Isto é feito através do carregamento de um registro com um certo dado. Para isto é necessário

colocar o dado no barramento e dar um pulso para o carregamento do registro. Esse pulso é o SP e os comandos são os seguintes:

- POKE 49335,0: digitaliza todos os "pixels";
- POKE 49335,1: digitaliza "pixels" ímpares;
- POKE 49335,2: digitaliza "pixels" pares;
- POKE 49335,3: não digitaliza nenhum "pixel".

Qualquer um dos comandos acima gera o pulso SP, variando apenas o dado a ser carregado.

Uma vez feito um ajuste, ele permanecerá até que novamente venha a ser modificado por um novo comando.

5.3 - AJUSTE DO TEMPO DE INTEGRAÇÃO

Os circuitos necessários para o ajuste do tempo de integração foram estudados na Seção 4.2. Como no caso da escolha dos elementos a digitalizar, aqui também é feito o ajuste via carregamento de registros. É carregado um registro de 12 bits ou dois registros de seis bits formando uma palavra de 12 bits, como é mostrado na Figura 5.1. Esta palavra pode conter em números decimais um valor entre 0 e 4095.

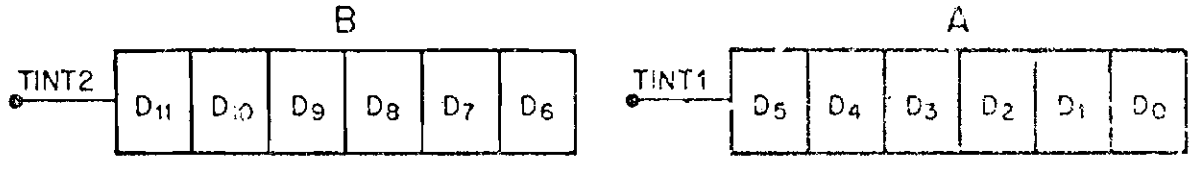


Fig. 5.1 - Registros utilizados para o ajuste do tempo de integração.

Se um dos registros de 6 bits for chamado de A e o outro de B, a parte menos significativa da palavra de 12 bits estará contida em A e a mais significativa em B.

Para armazenar um número decimal entre 0 e 4095 ele terá de ser separado em duas partes de seis bits. Se esse número for X, ele poderá ser desmembrado do seguinte modo:

- B = INT(x/64),
- A = x - 64*B,

onde a instrução INT calcula a parte inteira da expressão entre parênteses; A fica sendo a parte menos significativa e B, a parte mais significativa do dado a ser carregado.

Para que as duas partes possam ser carregadas, é necessário colocar os dados no barramento e gerar os pulsos de carregamento TINT1 e TINT2, o que é feito do seguinte modo:

- POKE 49334, A;
- POKE 49333, B;

A primeira instrução gera TINT1 e armazena a parte menos significativa; a segunda instrução gera TINT2 e armazena a parte mais significativa.

Agora que se sabe como armazenar o dado, é necessário saber qual é a sua relação com o tempo de integração.

A palavra de 12 bits carregada é utilizada como entrada para um contador. Esse contador pode contar no máximo de 0 a 4095, mas na verdade ele conta desde o valor carregado até ao máximo (4095).

O "clock" do contador é uma forma de onda com o mesmo período que o pulso ϕT.

Portanto, a contagem de pulsos que define o tempo de integração é:

- 4095 - x,

onde x é o valor carregado.

Consequentemente, o tempo de integração é:

- t integração = (4095 - x) $T_{\phi T}$,

sendo $T_{\phi T}$ o período da forma de onda ϕT.

Conhecendo esta relação é fácil fazer uma pequena rotina onde se entra apenas com o tempo de integração, e ela se encarrega de calcular o valor do X, desmembrá-lo e armazená-lo.

5.4 - LEITURA DA MEMÓRIA INTERMEDIÁRIA

Para a leitura da memória intermediária são necessários três sinais que foram chamados na Seção 4.1 de PCTL, PEEK (49331) e PEEK (49332).

O pulso PCTL gera um sinal de habilitação para a memória. que permite a leitura, e incrementa o contador gerador de endereços, preparando-o para a próxima leitura. Os outros dois comandos são utilizados para ler o dado em duas etapas: primeiro os quatro bits menos significativos; em seguida os oito bits mais significativos.

Para ler um dado é necessária a seguinte sequência de comandos:

```
POKE 49330,0
X = PEEK (49332) * 16 + PEEK (49331)
```

O primeiro comando é a instrução "BASIC" necessária para gerar o pulso PCTL. O segundo comando é formado por várias instruções "BASIC", que lêem o dado em duas etapas, recompõem-no e atribuem o seu valor à variável x. Repetindo esta sequência o número de vezes que for necessário e substituindo x por uma variável indexada, podem-se ler todos os dados armazenados na memória intermediária e passá-los para o microcomputador.

5.5 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROGRAMA PARA AQUISIÇÃO DE UMA LINHA

Na Seção anterior apresentaram-se todos os comandos necessários para operar o sistema de caracterização de CCDs. Nesta seção apresenta-se o diagrama de blocos completo para a aquisição e plotagem de uma linha do CCD. Este é um dos testes feitos sobre o sistema no Capítulo 6.

O diagrama de blocos que é apresentado na Figura 5.2 é formado dos seguintes blocos:

- *Escolher "pixels" a digitalizar:* é feito usando o comando POKE 49335, D, conforme explicado na Seção 5.2.
- *Ajustar tempo de integração:* é feito pelos comandos POKE 49334, A e POKE 49333, B, mais algumas instruções utilizadas para calcular os valores de A e B.
- *Adquirir linha para a memória intermediária:* enviam-se os pulsos CTL1 (POKE 49329,0) e CTL0 (POKE 49328,0), nesta ordem, e após alguns milissegundos a linha estará digitalizada e armazenada na memória intermediária.
- *Ler um dado da memória intermediária:* é feito enviando o pulso PCTL e os comandos de leitura, ou seja:

  POKE 49330,0;

  X = PEEK (49332)*16 + PEEK(49331).

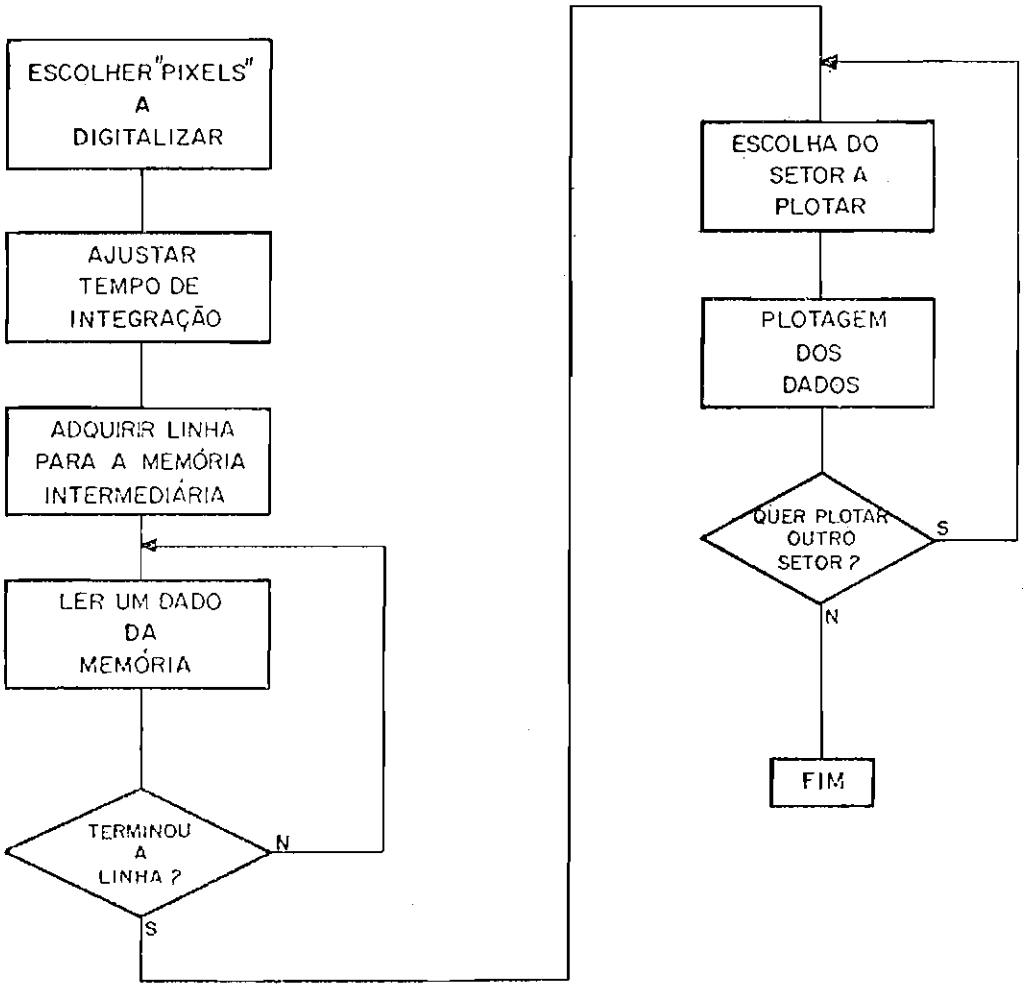


Fig. 5.2 - Diagrama de blocos para aquisição e traçado dos dados de uma linha.

Esta sequência lê apenas um dado e incrementa o contador de endereçamento. Para ler todos os dados é necessário repetir a sequência.

- *Terminou a linha?* Faz um "loop" para ler os dados. Verifica se o último elemento foi lido; se foi segue em frente, se não foi volta e lê mais um dado.

- *Escolha do setor a plotar:* Devido à sua resolução, a tela do microcomputador permite mostrar apenas 250 "pixels" de cada vez. Portanto, para plotar o número do "pixel" versus o valor do seu sinal é necessário dividir a linha do vídeo do CCD em sete setores. Este bloco pede ao usuário que escolha qual o setor que deve ser plotado.

- *Plotagem dos dados:* Traça os eixos x e y e coloca para cada "pixel" o sinal correspondente ponto a ponto.

- *Quer plotar outro setor?* Se não há necessidade de plotar outro setor, termina o programa. Se há necessidade, volta ao bloco que permite a escolha do setor que deve ser plotado.

Este diagrama de blocos mostra em linhas gerais o que é feito para a aquisição de uma linha. O programa de teste completo é apresentado no Apêndice A.

5.6 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROGRAMA PARA MEDIDA DA EFICIÊNCIA DE TRANSFERÊNCIA DO CCD

As cargas são transferidas no interior do CCD através de dois registros analógicos de deslocamento.

Esses registros possuem uma certa eficiência de transferência de cargas cuja metodologia de medida foi discutida no Capítulo 2. A Figura 5.3 apresenta o diagrama de blocos para medida da eficiência de transferência baseada nessa metodologia.

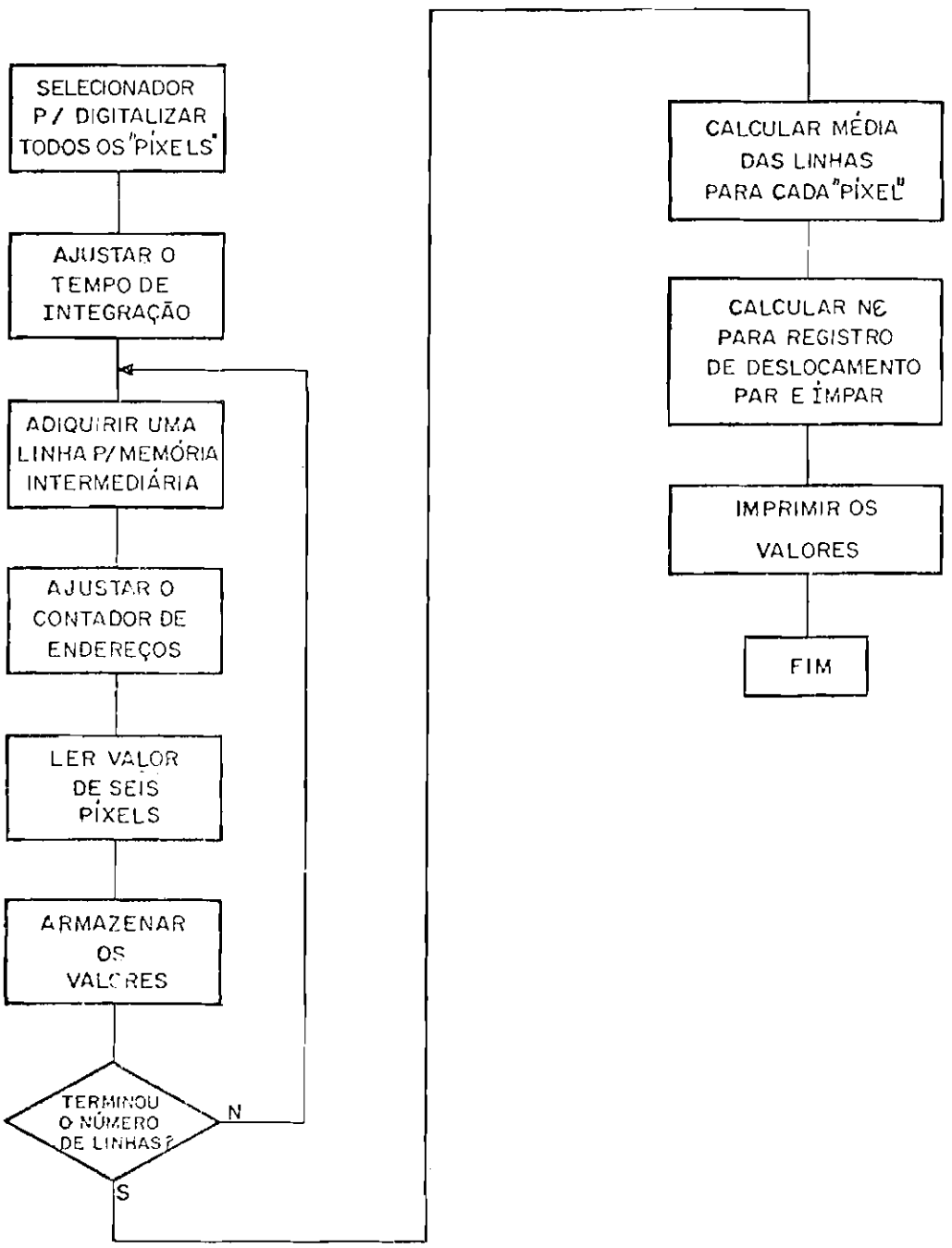


Fig. 5.3 - Diagrama de blocos para medida da eficiência de transferência.

Agora é apresentada uma análise bloco a bloco do diagrama de blocos:

- *Selecionar para digitalizar todos os "pixels":* Utilizando os comandos estudados anteriormente deve-se fazer a escolha para digitalizar todos os "pixels", pois neste caso é interessante pegar o valor dos "pixels" pares e ímpares.

- *Ajustar o tempo de integração:* Deve ser ajustado para o tempo no qual se deseja medir a eficiência de transferência.

- *Adquirir uma linha para memória intermediária:* Enviam-se os pulsos CTL1 e CTL0 para que uma linha seja digitalizada e armazenada na memória intermediária.

- *Ajustar o contador de endereços:* Para medir a eficiência de transferência é avaliada a carga perdida de um pulso deslocado por todo o registro analógico de deslocamento. Utiliza-se como pulso a ser deslocado o pulso de referência de branco, que é um sinal que vem no fim da linha. Assim interessa apenas medir o sinal de alguns "pixels" em volta do pulso principal, e não toda a linha. Mas quando vai ser efetuada a leitura, o contador de endereços está posicionado para ler o início da memória intermediária, ou seja, o início da linha do CCD. Portanto, há necessidade de dar pulsos de "clock" para que o valor do contador seja incrementado até o endereço necessário. Foi visto anteriormente que o contador é incrementado pelo pulso PCTL; portanto, é necessário enviar um certo número de pulsos PCTL sem fazer a leitura de dados até que o contador contenha o endereço da posição a ser lida.

- *Ler valor de seis "pixels":* Foi visto na Seção 2.4.1 que é necessário medir o sinal de três elementos para avaliar a eficiência de transferência: o pulso principal, o pulso seguinte para avaliar a carga perdida e o elemento anterior ao pulso principal para que possa ser descontado o sinal de escuro. Na verdade,

o CCD possui dois registros analógicos de deslocamento, um para os elementos pares e outro para os elementos ímpares. Daí, é necessário medir o sinal de seis elementos, para poder medir a eficiência dos dois registros.

- *Armazenar os valores:* Os valores lidos para todos os elementos são armazenados na memória interna ao microcomputador.

- *Terminou o número de linhas?* Para ter um valor confiável de eficiência de transferência, é necessário adquirir um elevado número de linhas, por exemplo 50 ou 100. Este bloco verifica se todas as linhas já foram adquiridas; se foram o programa segue em frente, se não volta e adquire mais uma linha.

- *Calcular média das linhas para cada "pixel":* Calcula a média para cada elemento de todos os valores adquiridos. Isto elimina o ruído temporal, tornando a medida mais confiável.

- *Calcular Nε para cada registro de deslocamento par e ímpar:* A carga perdida em N transferências, que é $N\varepsilon$, é calculada utilizando a Equação 2.4, desenvolvida no Capítulo 2. A fração de carga perdida por transferência é ε; portanto, a eficiência de transferência é $1 - \varepsilon$.

- *Imprimir os valores:* Os valores resultantes são impressos na tela ou na impressora.

O programa completo em linguagem "BASIC" utilizado para este teste está no Apêndice A.

5.7 - DIAGRAMA DE BLOCOS PARA MEDIDA DO SINAL E RUÍDO DE ESCURO

Na Figura 5.4 apresentam-se o diagrama de blocos de um programa que mede o ruído no escuro e o sinal de escuro para um determinado "pixel" escolhido do CCD. Pode-se escolher um "pixel" representante de toda a barra CCD, medir alguns "pixels" e achar a média, ou ainda medir o sinal de todos os "pixels" do CCD.

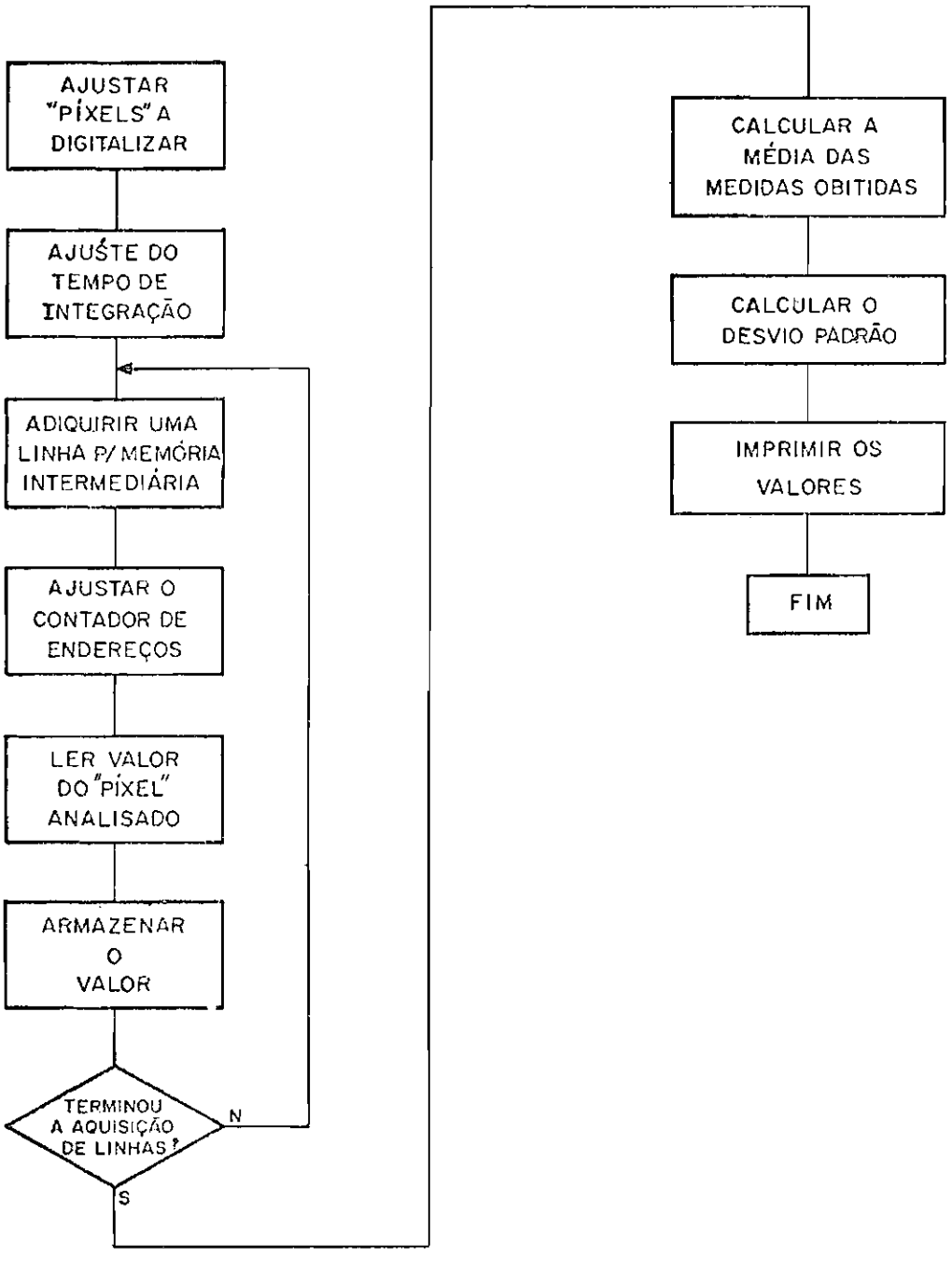


Fig. 5.4 - Diagrama de blocos para medida do sinal e ruído de escuro.

Análise dos blocos:

- *Ajustar "pixels" a digitalizar:* Ajustar a digitalização para todos os "pixels", para "pixels" ímpares ou para "pixels" pares, dependendo do interesse.

- *Ajuste do tempo de integração:* Ajustar para o tempo no qual se quer fazer as medidas.

- *Adquirir uma linha para memória intermediária:* Enviar os pulsos CTL1 e CTL0.

- *Ajustar o contador de endereços:* Neste caso devem ser enviados pulsos PCTL até que o contador de endereçamento esteja ajustado para a leitura do "pixel" que está sendo analisado.

- *Ler valor do "pixel" analisado:* Envia-se a sequência de comandos que lêem um valor da memória intermediária.

- *Armazenar o valor:* O valor medido é armazenado na memória interna do microcomputador para posterior utilização.

- *Terminou a aquisição de linhas?* Verifica se já foi efetuado o número suficiente de amostragens do "pixel"; se foi continua em frente, se não foi volta e faz mais uma amostragem.

- *Calcular a média das medidas obtidas:* Utiliza todos os dados armazenados na memória do microcomputador para calcular a média através da utilização da Equação 2.5. Essa média é o próprio sinal de escuro.

- *Calcular o desvio padrão:* Conhecendo todos os valores medidos e também a média, utiliza-se a Equação 2.7 para calcular o desvio padrão. O desvio padrão é justamente a tensão eficaz do ruído na saída do CCD, ou seja, o ruído no escuro.

- *Imprimir os valores:* Faz a impressão dos resultados para que estes possam ser interpretados.

O programa completo referente a este diagrama de blocos é apresentado no Apêndice A.

Neste capítulo foram apresentados diagramas de blocos para a aplicação de alguns testes sobre o CCD. Na verdade, existe uma infinidade de testes que podem vir a ser aplicados com a utilização deste sistema, entre os quais estão aqueles citados na Seção 2.3.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

No Capítulo 2 foram apresentados os principais testes necessários para a caracterização de redes de detetores do tipo CCD. Foram também discutidas técnicas para efetuar alguns desses testes, os quais foram realizados com o intuito de mostrar a operacionalidade do sistema de caracterização de CCDs.

Para controle do sistema foram desenvolvidos programas baseados nos fluxogramas apresentados no Capítulo 5.

6.1 - AQUISIÇÃO DE UMA LINHA

Este teste é efetuado simplesmente para explicar a aquisição de uma linha pelo sistema de caracterização. O sinal contido na linha não é relevante, pois o CCD estava "olhando" para uma cena qualquer, sem a colocação de qualquer sistema óptico à sua frente.

O resultado da aquisição da linha de vídeo do CCD é apresentado sob a forma de um gráfico do número do "pixel" versus tensão na saída em mV.

Os dados para a construção da curva foram obtidos da saída do CCD pelo sistema de caracterização e colocados na memória do microcomputador. Em seguida, a curva foi traçada na impressora gráfica (Figura 6.1).

6.2 - MEDIDA DA EFICIÊNCIA DE TRANSFERÊNCIA

Discutiu-se no Capítulo 2 a medida da eficiência de transferência dos registros de deslocamento analógicos do CCD. Quando a carga é deslocada entre os poços de potencial, uma pequena fração fica para trás, fração essa que foi chamada de ε. Portanto, a eficiência de transferência de carga é $1 - \varepsilon$.

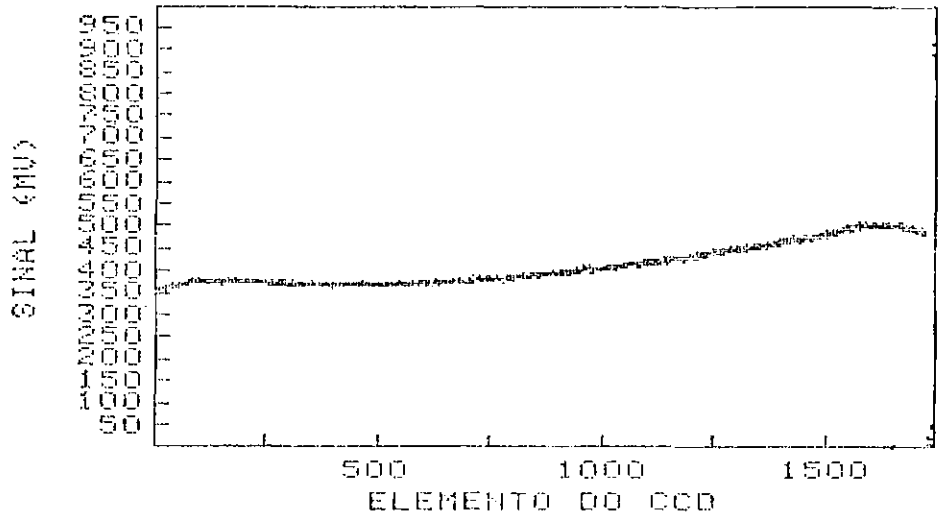


Fig. 6.1 - Linha de vídeo do CCD obtida pelo sistema de caracterização de CCDs.

Na Figura 6.2 aparece o final de uma linha plotada pelo sistema de caracterização de CCDs. Logo após o término dos "pixels" com sinal válido, aparecem alguns "pixels" de isolação e em seguida dois "pixels" com sinal em torno de 900 mV. Esses dois pulsos são os sinais de referência de branco ("white reference"), que são aqui utilizados para a avaliação da eficiência de transferência.

Na verdade o CCD possui dois registros de deslocamento, um para os "pixels" ímpares e outro para os "pixels" pares; cada um dos sinais de referência de branco passa por um dos registros de deslocamento. Assim, os dois registros podem ter sua eficiência de transferência avaliada.

Logo depois dos pulsos de referência de branco, podem ser observados dois pulsos com sinal ligeiramente superior ao dos pulsos posteriores a eles. O sinal desses dois pulsos é devido à carga perdida na transferência dos pulsos de referência de branco.

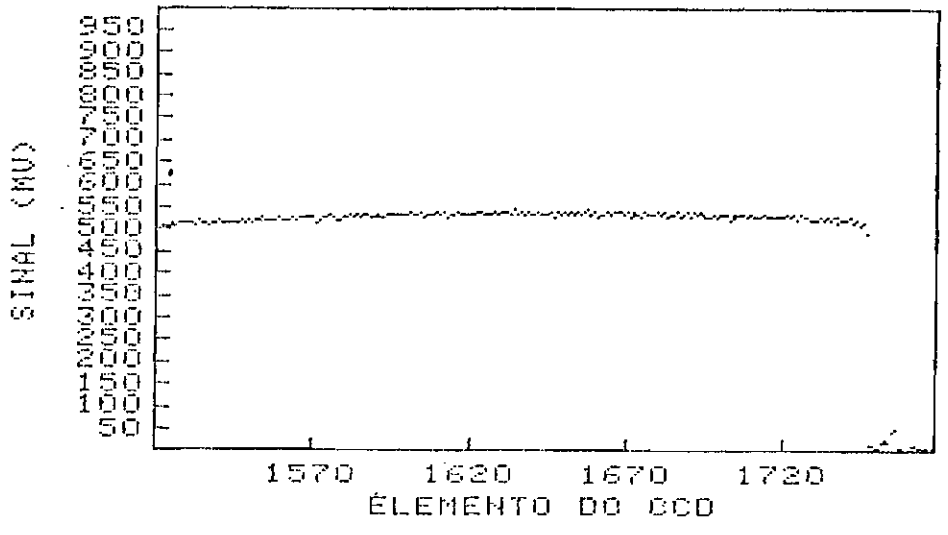


Fig. 6.2 - Gráfico do fim de uma linha do CCD, que mostra os sinais de referência de branco e o sinal devido à carga perdida por eles.

Assim, aplicando a Equação 2.4 pode ser calculado o N_E, que é a carga perdida durante N transferências.

Para que possa ser eliminado o ruído, o sinal utilizado é uma média da aquisição de 250 linhas.

As medidas são feitas no escuro para que cargas provenientes de outros sinais não interfiram.

Foram efetuadas medidas em três CCDs diferentes. O programa de controle adquiriu 250 linhas para cada CCD, efetuou a média, aplicou a Equação 2.4 para cada registro de deslocamento e imprimiu os seguintes resultados:

- CCD1
  - . registro ímpar: $N\varepsilon = 2{,}5317 \times 10^{-3}$;
  - . registro par : $N\varepsilon = 2{,}2487 \times 10^{-3}$.

- CCD2
  - . registro ímpar: $N\varepsilon = 3{,}3182 \times 10^{-2}$;
  - . registro par : $N\varepsilon = 3{,}4369 \times 10^{-3}$.

- CCD3
  - . registro ímpar: $N\varepsilon = 1{,}5159 \times 10^{-2}$;
  - . registro par : $N\varepsilon = 2{,}4841 \times 10^{-2}$.

Estas são as frações de carga perdidas em cada registro para os três CCDs. Para o CCD 122 cada registro possui 879 estágios, ou seja, para o pulso de referência de branco:

$$N = 879.$$

Então a perda de transferência para um estágio é:

$$\varepsilon = \frac{N\varepsilon}{N},$$

ou seja:

- CCD1
  - . registro ímpar: $\varepsilon = 2{,}8802 \times 10^{-6}$;
  - . registro par : $\varepsilon = 2{,}5582 \times 10^{-6}$.

- CCD2

  . registro ímpar: $\varepsilon = 3{,}7750 \times 10^{-5}$;

  . registro par : $\varepsilon = 3{,}9100 \times 10^{-6}$.

- CCD3

  . registro ímpar: $\varepsilon = 1{,}7246 \times 10^{-5}$;

  . registro par : $\varepsilon = 2{,}8261 \times 10^{-5}$.

Logo, a eficiência de transferência, que é 1 - ε, pode ser calculada:

- CCD1

  . registro ímpar: $1-\varepsilon = 0{,}999997$;

  . registro par : $1-\varepsilon = 0{,}999997$.

- CCD2

  . registro ímpar: $1-\varepsilon = 0{,}999962$;

  . registro par : $1-\varepsilon = 0{,}999996$.

- CCD3

  . registro ímpar: $1-\varepsilon = 0{,}999983$;

  . registro par : $1-\varepsilon = 0{,}999972$.

Estes valores podem ser comparados com os valores fornecidos pelo fabricante como valores típicos para a eficiência de transferência, para uma transferência de um estágio. No "Fairchild CCD 122/142 data sheet" encontra-se o valor típico:

$\varepsilon = 0{,}999995$.

As condições para a obtenção dos dados foram as mesmas tanto para o fabricante quanto para os testes efetuados, quais sejam:

- $T_A = 25^oC$;
- $f_{\phi R} = 0,5MHz$;
- $t_{int} = 10ms$;

com todas as tensões de alimentação, de referência e dos "clocks" no valor nominal.

Pode-se observar que os dados obtidos variam bastante de CCD para CCD e mesmo para os dois registros de um mesmo CCD. No entanto, essa variação se dá em torno do valor típico fornecido pelo fabricante.

Entre as medidas observam-se registros com eficiência superior e registros com eficiência inferior ao valor típico.

Observa-se também que o CCD1 possui as eficiências dos dois registros iguais, enquanto os outros dois apresentam eficiências de transferência consideravelmente diferentes para cada registro de deslocamento.

6.3 - MEDIDA DO SINAL E RUÍDO NO ESCURO

O CCD possui um sinal de escuro devido à geração térmica, que varia de "pixel" para "pixel". Então, para avaliar corretamente um CCD, deve ser medido o sinal de escuro de todos os seus "pixels", ou então escolher um ou alguns que representem a média. Como exemplo foi medido o sinal de escuro e o ruído de escuro do "pixel" número 33 de um CCD, utilizando as seguintes condições:

$T_A = 25^oC$;
$f_{\phi R} = 0,5MHz$;
$t_{int} = 10ms$.

No Capítulo 2 mostrou-se que quando se mede o sinal de um "pixel" no escuro um elevado número de vezes, o sinal de escuro é a média e o ruído eficaz é o desvio padrão de todas as medidas.

Foi adquirido o sinal do "pixel" número 33 no escuro para 1.500 linhas, armazenando todos os dados na memória do microcomputador.

Aplicando a Equação 2.5 obteve-se

$$V_{escuro} = V_{médio} = 6,22mV$$

e aplicando a Equação 2.7 chegou-se a

$$\text{DESVIO PADRÃO} = V_{ruído\ eficaz} = 0,369mV.$$

No "Fairchild CCD 122/142 data sheet" encontram-se para as mesmas condições:

$$V_{escuro\ típico} = 5mV;$$

$$V_{ruído\ pico\ a\ pico} = 2,0mV.$$

O mesmo manual diz que:

$$V_{ruído\ pp} \cong 5 \times V_{ruído\ eficaz};$$

portanto, para a medida efetuada tem-se

$$V_{ruído\ pp} \cong 5 \times 0,369mV = 1,845mV.$$

Chega-se à conclusão de que os valores medidos são bastante próximos dos valores típicos do CCD 122, e ainda deve-se levar em conta que o valor para um determinado CCD pode ser bastante diferente do valor típico.

6.4 - UNIFORMIDADE DO SINAL DE ESCURO

Na seção anterior mediu-se o sinal de escuro para um determinado "pixel"; agora é apresentado um gráfico do sinal de escuro para todos os "pixels" do CCD. Assim poderão ser observadas não uniformidades.

Para eliminar o ruído, o sistema de caracterização de CCDs adquire 50 linhas, faz a média e traça o número do "pixel" versus o sinal de escuro. Foram feitas medidas para três CCDs diferentes e os três gráficos podem ser vistos na Figura 6.3.

Inicialmente pode ser observado que existe uma diferença entre o nível médio do sinal de escuro entre os "pixels" pares e ímpares.

Essa diferença é devida ao desbalanceamento par/ímpar na saída do CCD e ao ruído produzido pelos "clocks" na região de referência de zero do sinal dos "pixels". Este ruído pode produzir uma leve diferença no grampeamento dos "pixels" pares e ímpares.

Visualmente no gráfico parece ser uma diferença razoavelmente grande, mas a escala do gráfico nas ordenadas está ampliada, para que o sinal de escuro possa ser bem observado. Em relação à tensão de saturação, ela representa menos de 0,1%.

Outro fato que chama a atenção é uma região de sinal de escuro anormalmente elevado no começo da linha do primeiro CCD.

A escala das ordenadas da Figura 6.3 pode ser expandida, o que permite uma melhor visualização do sinal de escuro para cada "pixel". Isto é feito para os 250 "pixels" iniciais do primeiro CCD, obtendo-se o gráfico da Figura 6.4.

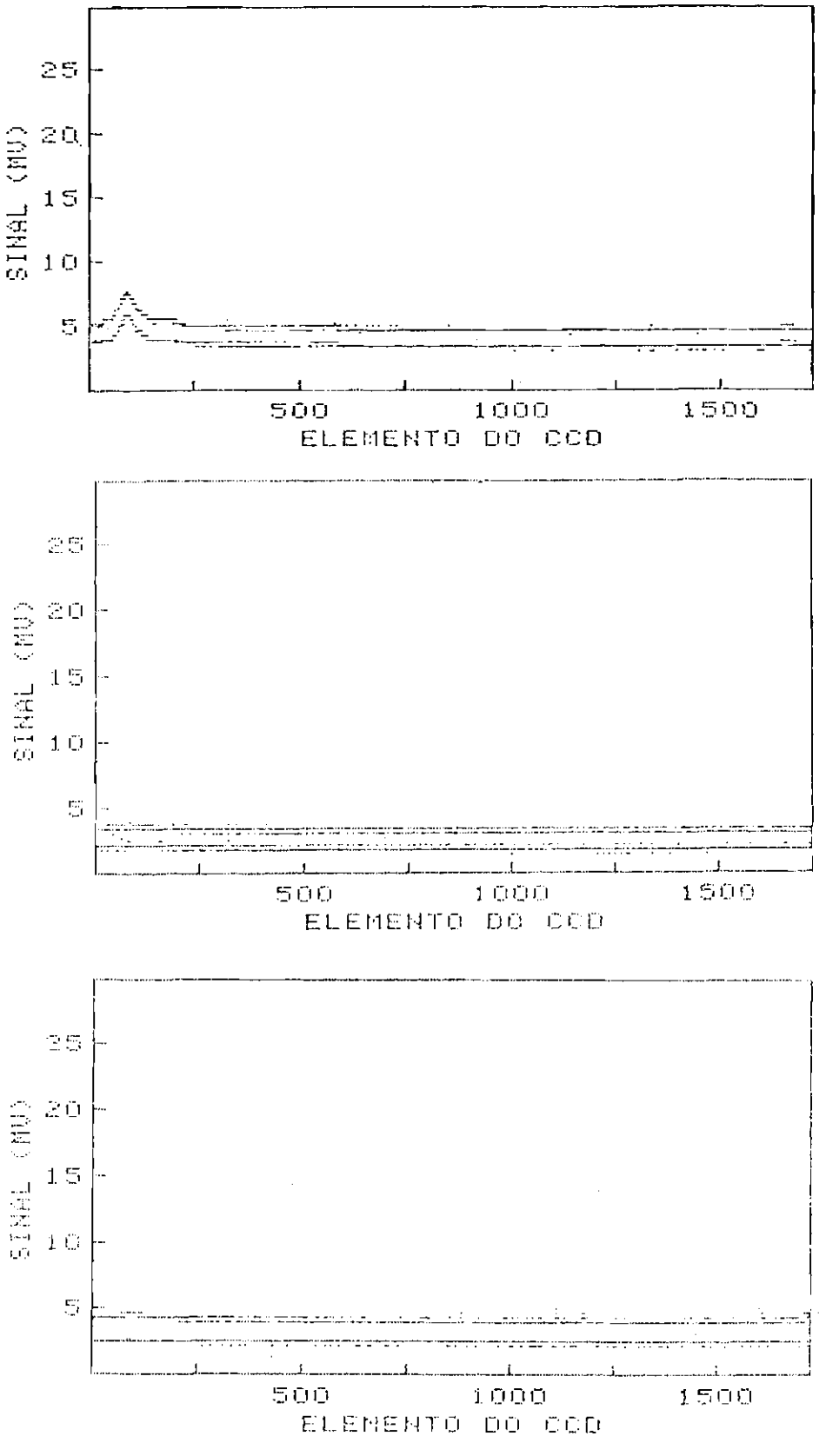


Fig. 6.3 - Número do "pixel" x sinal de escuro para três CCDs diferentes.

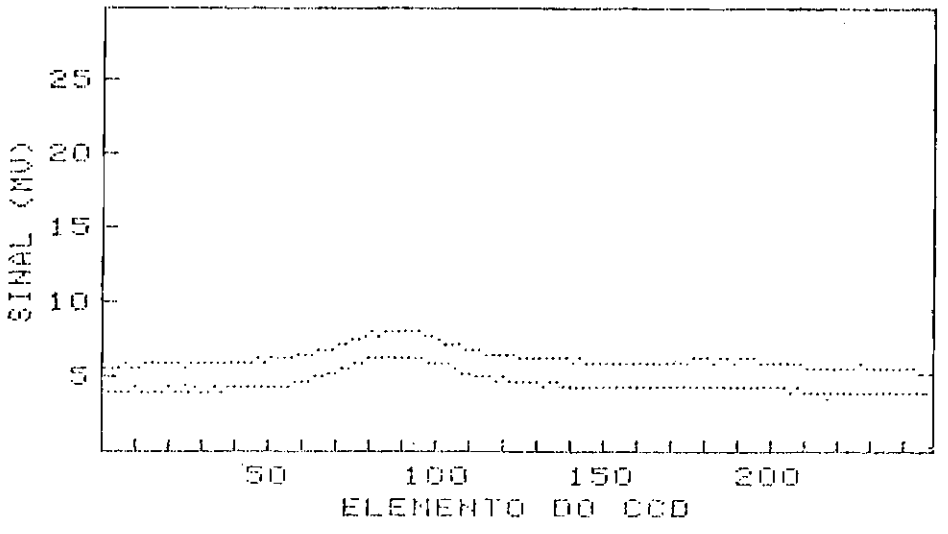


Fig. 6.4 - Número do "pixel" x sinal de escuro para os 250 "pixels" iniciais do primeiro CCD.

Agora pode ser perfeitamente identificada a região do sinal de escuro anormalmente alto. Na Figura 6.4 pode ser visto que ela se situa aproximadamente do "pixel" 60 ao "pixel" 120, tendo seu pico aproximadamente no "pixel" 90.

Esta anormalidade provavelmente se deve a uma imperfeição na dopagem do substrato em que foram contruídos os detetores CCD.

Fora esta região anormal no primeiro CCD, todos os CCDs apresentam boa uniformidade, com exceção de alguns "pixels" isolados que destoam da média.

6.5 - CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi a construção de um sistema de aquisição de dados que fornecesse ferramentas para uma fácil caracterização de dispositivos CCD.

Foram então efetuados alguns testes neste capítulo, que mostram que o sistema de caracterização de CCDs é operacional e bastante versátil.

Devido à incorporação de um microcomputador ao sistema, pode-se fazer qualquer tratamento adicional necessário nos dados.

Apesar de não terem sido feitas aqui outras medidas, o sistema de caracterização pode fazer quase todos os tipos de medidas de caracterização eletrônica do CCD, bastando para isto desenvolver o "software" e o sistema óptico adequados para cada caso.

Por tudo isto, tem-se convicção de que o sistema de caracterização de CCDs será de grande utilidade na construção tanto das câmeras de sensoriamento remoto da MECB (Missão Espacial Completa Brasileira), quanto em outros programas que utilizem CCDs e venham a se instalar no INPE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEYNON, J.D.E.; LAMB, D.R. *Charge-coupled devices and their applications*. London, McGraw-Hill, 1980.

BARBE, D.F. Imaging devices using the charge-coupled concept. *Proceedings of the IEEE*, 63:38-67, Jan. 1975.

HOWES, M.J.; MORGAN, D.V. *Charge-coupled devices and systems*. Chichester, John Wiley, 1979.

KOSONOCKY, W.F.; SAUER, D.J. The ABCs of CCDs. *Eletronic design*, 23: 58-63, Apr. 1975.

LINDGREN, B.W.; McELRATH, G.W. *Introduction to probability and statistics*, 3. ed, New York, the Macmillan, 1969.

POOLE, L.; McNIFF, M.; COOK, S. *Apple II user's guide*. Berkeley, CA, Osborne/McGraw-Hill, 1981.

APÊNDICE A

PROGRAMAS UTILIZADOS PARA TESTE

A.1 - PROGRAMA PARA CALCULAR A EFICIÊNCIA DE TRANSFERÊNCIA

```
3  HIMEM: 35000
4  LOMEM: 16384
5  REM  -PROGRAMA QUE ADQUIRE 250 VEZES O SINAL NO ESCURO
       O PULSO PRINCIPAL E O SEGUINTE,CALCULA A MEDIA E C
     ALCULA NE PARA OS SHIFT REGISTERS PAR E IMPAR.
6 LI = 250
7  REM  SELECIONA TODOS OS PIXELS
8  POKE 49335,0
9  REM  AJUSTA TEMPO DE INTEGRACAO
10  INPUT "TINT ENTRE 3.52 E 16.383 MS: ";TI
11 N =  INT (TI * 1000 / 4)
12 T = 4095 - N
13 T2 =  INT (T / 64)
14 T1 = T - 64 * T2
15  POKE 49334,T1
16  POKE 49333,T2
19  DIM A(6,LI)
20  DIM I(LI)
25  DIM P(LI)
30 K = 49330
40 L = 0
50 M = 49331
51 N = 49332
52 O = 16
60  FOR R = 1 TO LI
90  POKE 49329,0
100  POKE 49328,0
110  FOR I = 1 TO 6
120  NEXT I
130  FOR I = 1 TO 1755
140  POKE K,L
145 U =  PEEK (M) +  PEEK (N) * O
150  NEXT I
160  FOR J = 1 TO 6
170  POKE K,L
180 U =  PEEK (M) +  PEEK (N) * O
185 A(J,R) = U
187  PRINT J,U
190  NEXT J
200 I(R) = (A(5,R) - A(1,R)) / (A(3,R) - A(1,R))
210 P(R) = (A(6,R) - A(2,R)) / (A(4,R) - A(2,R))
215  PRINT "    "
220  PRINT "LINHA",R
230  PRINT I(R),P(R)
```

```
232  PRINT
235  PRINT "**********************"
240  NEXT R
250 C = 0
255 D = 0
260  FOR R = 1 TO LI
270 C = C + I(R)
280 D = D + P(R)
290  NEXT R
300 C = C / LI
310 D = D / LI
320  PRINT "MEDIA"
330  PRINT C,D
340 A1 = 0:B1 = 0:A2 = 0:B2 = 0:A3 = 0:B3 = 0
350  FOR K = 1 TO LI
360 A1 = A1 + A(1,K)
370 B1 = B1 + A(2,K)
380 A2 = A2 + A(3,K)
390 B2 = B2 + A(4,K)
400 A3 = A3 + A(5,K)
410 B3 = B3 + A(6,K)
420  NEXT K
430 A1 = A1 / LI:B1 = B1 / LI:A2 = A2 / LI:B2 = B2 / LI:A
    3 = A3 / LI:B3 = B3 / LI
440 C1 = (A3 - A1) ./ (A2 - A1)
450 D1 = (B3 - B1) / (B2 - B1)
460  PRINT : PRINT "MEDIAT: "
470  PRINT C1,D1
480  END
```

A.2 - PROGRAMA QUE MEDE O SINAL E O RUÍDO NO ESCURO

```
4  HIMEM: 35000
5  LOMEM: 16384
10  REM  PROGRAMA QUE ADQUIRE VARIAS VEZES O SINAL DE UM
      PIXEL DO CCD E CALCULA O RUIDO
11 C2 = 1500:C3 = 50
12 C0 = 0:C1 = 1:C4 = 6:C5 = 49330:C6 = 49329:C7 = 49328:
      C8 = 2:SOMA = 0
13 K = 49331:L = 49332:M = 16
14 C9 = C3 - 1
15  DIM K(C2)
20  DIM A(1768)
21  REM  SELECIONA TODOS OS PIXEIS
22  POKE 49335,0
30  REM  AJUSTA TEMPO DE INTEGRACAO
31  INPUT "TINT ENTRE 3.53 E 16.383 MS: ";TI
32 N =  INT (TI * 1000 / 4)
33 T = 4095 - N
34 T2 =  INT (T / 64)
36 T1 = T - 64 * T2
38  POKE 49334,T1
40  POKE 49333,T2
100  REM  GERACAO DOS PULSOS CTL0 E CTL1
109  FOR L1 = C1 TO C2
111  POKE C4,C0
112  POKE C7,C9
115  FOR I = C1 TO C4
120  NEXT I
130  REM  LEITURA DOS DADOS DA MEMORIA AUXILIAR
140  REM  GERACAO DOS PULSOS PCTL
145  FOR I = C1 TO C9
146  POKE 49330,C0
147  FOR B = 1 TO 2
149  NEXT
151  NEXT
152  POKE C5,C0
155 A(I) =  PEEK (K) +  PEEK (L) * M
158  PRINT L1,A(C3)
159 K(L1) = A(C3)
180 SOMA = SOMA + K(L1)
190  NEXT
200 MED = SOMA / C2
210 VAR = 0
220  FOR L1 = C1 TO C2
230 Z = K(L1) - MED
240 VAR = VAR + Z ^ C8
250  NEXT L1
260 VARIANCIA = VAR / C2
270 RUIDO =  SQR (VARIANCIA)
280  PRINT "MEDIA: ";MED
290  PRINT "RUIDO: ";RUIDO
300  PRINT "SINAL MEDIO: ";MED * 2.44 / 7.78;" MV"
310  PRINT "RUIDO EFICAZ: ";RUIDO * 2.44 / 7.78;" MV"
320  END
```

A.3 - PROGRAMA QUE ADQUIRE UMA LINHA DO CCD E MOSTRA EM FORMA DE GRÁFICO NA TELA DE ALTA RESOLUÇÃO DO MICROCOMPUTADOR

```
5  HIMEM: 16383
10  REM  -PROGRAMA QUE ADQUIRE UMA LINHA DE VIDEO DO CCD
     E A PLOTA NA TELA DE ALTA RESOLUCAO DO MICROCOMPUTAD
     OR.
20  DIM A(1768)
21  REM  SELECIONA TODOS OS PIXEIS
22  POKE 49335,0
30  REM  AJUSTA TEMPO DE INTEGRACAO
31  INPUT "TINT ENTRE 3.52 E 16.383 MS: ";TI
32 N =  INT (TI * 1000 / 4)
33 T = 4095 - N
34 T2 =  INT (T / 64)
36 T1 = T - 64 * T2
38  POKE 49334,T1
40  POKE 49333,T2
100  REM  GERACAO DOS PULSOS CTL0 E CTL1
110 TI = 6
111  POKE 49329,0
112  POKE 49328,0
115  FOR I = 1 TO  INT (TI)
120  NEXT I
130  REM  LEITURA DOS DADOS DA MEMORIA AUXILIAR
140  REM  GERACAO DOS PULSOS PCTL
141 K = 49331
142 L = 49332
143 M = 16
145  FOR I = 1 TO 1768
150  POKE 49330,0
155 A(I) =  PEEK (K) +  PEEK (L) * M
157  NEXT I
160  REM  PLOTAGEM DOS DADOS DO CCD
165  INPUT "BLOCO NUMERO: ";BN
167  IF BN = 8 THEN  GOTO 240
170  HGR2
180  & SCALE,250 * (BN - 1),250 + 250 * (BN - 1),0,1000
190 LX$ = "ELEMENTO DO CCD":LY$ = "SINAL (MV)"
200  & LABELAXES,50,50
205  & AXES,250 * (BN - 1),0,10,50
210  FOR I = 250 * (BN - 1) TO 250 + 250 * (BN - 1)
220  &  DRAW ,I,A(I) * 2.44 / 7.78
225  & PENUP
230  NEXT I
235  GOTO 165
240  END
```

OBS.: Para a plotagem dos dados é utilizado o programa comercial AMPERGRAPH. Tal programa é utilizado juntamente com o programa em BASIC, e os comandos para ele são precedidos pelo símbolo &. Este programa facilita o traçado dos eixos, a adequação da escala e a escrita de informações nos eixos ou sobre a curva. No lugar do AMPERGRAPH pode ser usado qualquer outro programa para traçar gráficos, ou então introduzida uma rotina em BASIC com essa finalidade.

APÊNDICE B

FOLHA DE ESPECIFICAÇÕES DO CCD 122/142

Apresenta-se uma cópia da folha de especificações do CCD 122/142 fornecida pelo fabricante, a qual facilitará muito a consulta e comparação de dados durante a leitura do texto.

FAIRCHILD
A Schlumberger Company

CCD

CCD122/142

The CCD142 is no longer carried. It has been replaced by the CCD143.

1728/2048-ELEMENT LINEAR IMAGE SENSOR

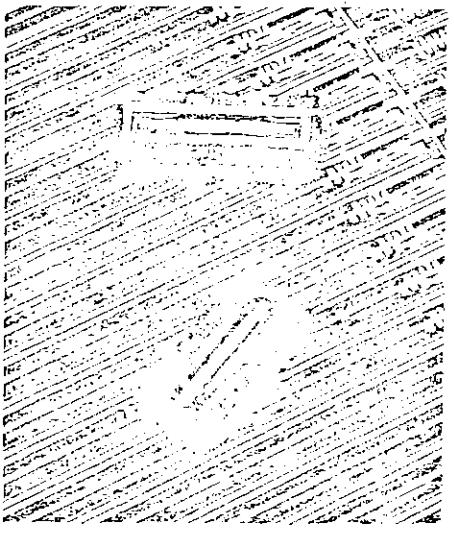
FAIRCHILD CHARGE COUPLED DEVICE

GENERAL DESCRIPTION—The CCD122 and CCD142 are monolithic 1728 and 2048-element line image sensors, respectively. The devices are designed for page scanning applications including facsimile, optical character recognition and other imaging applications which require high resolution and high sensitivity.

The 1728 sensing elements of the CCD122 provide a 200-line per inch resolution across an 8-1/2 inch page adopted as an international facsimile standard. The 2048 sensing elements of the CCD142 provide an 8-line per millimeter resolution across a 256 millimeter page adopted as the Japanese facsimile standard.

The CCD122 and the CCD142 have overall improved performance compared with the CCD121H including higher sensitivity, an enhanced blue response and a lower dark signal. The devices also incorporate on chip clock driver circuitry.

The photoelement size is 13 μ (0.51 mils) by 13 μ (0.51 mils) on 13 μ (0.51 mils) centers. The devices are manufactured using Fairchild advanced charge-coupled device n channel isoplanar buried-channel technology.



- ENHANCED SPECTRAL RESPONSE (PARTICULARLY IN THE BLUE REGION)
- LOW DARK SIGNAL
- HIGH RESPONSIVITY
- ON-CHIP CLOCK DRIVERS
- DYNAMIC RANGE TYPICAL 2500:1
- OVER 1V PEAK-TO-PEAK OUTPUT
- DARK AND WHITE REFERENCES CONTAINED IN A SAMPLE-AND-HELD OUTPUT
- SINGLE POWER SUPPLY

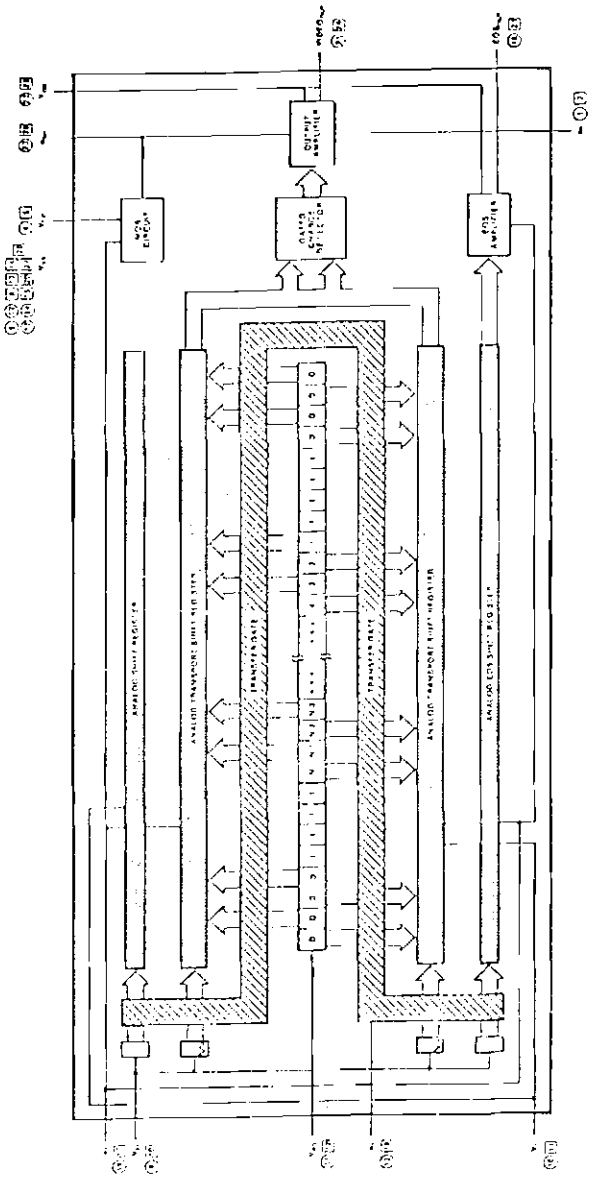
PIN NAMES

V_{PG}	Photogate
ϕ_T	Transfer Clock
ϕ_1	Transport Clock
VIDEOout	Output Amplifier Source
V_{DD}	Output Amplifier Drain
ϕ_R	Reset Clock
V_{DD}	Clock Driver Drain
V_R	Electrical Input Bias
V_T	Analog Transport Shift Register DC Electrode
EOSout	End-of-Scan Output
ϕ_{SH}	Sample-and-Hold Clock
V_{SS}	Substrate (GND)
NC	No Connection (Do not Ground)

CCD122/142 VS. CCD121H COMPARISON

PARAMETER	CCD122/142	CCD121H
Spectral Response — Blue	4:1 Improvement	—
Overall	2:1 Improvement	—
Dark Signal	2:1 Improvement	—
Responsivity	2:1 Improvement	—
On-Chip Clock Drivers	Yes	No
Dark and White References	Yes	No
Single Power Supply	Yes	No

FAIRCHILD • CCD122/142



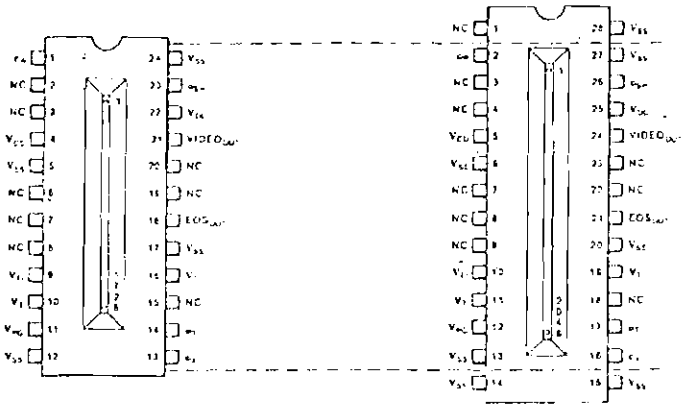
BLOCK DIAGRAM

FAIRCHILD
A Schlumberger Company

CCD

FAIRCHILD • CCD122/142

CONNECTION DIAGRAM
DIP (TOP VIEW)



CCD122 CCD142

FUNCTIONAL DESCRIPTION — The CCD122/142 consists of the following functional elements illustrated in the Block Diagram:

Image Sensor Elements — A line of 1725/2048 image sensor elements separated by diffused channel stops and covered by a silicon dioxide surface passivation layer. Image photons pass through the transparent silicon dioxide layer and are absorbed in the single crystal silicon creating hole-electron pairs. The photon generated electrons are accumulated in the photosites. The amount of charge accumulated in each photosite is a linear function of the incident illumination intensity and the integration period. The output signal will vary in an analog manner from a thermally generated noise background at zero illumination to a maximum at saturation under bright illumination.

Transfer Gate — Gate structure adjacent to the line of image sensor elements. The charge packets accumulated in the image sensor elements are transferred out via the transfer gate to the transport registers whenever the transfer gate voltage goes HIGH. Alternate charge packets are transferred to the analog transport shift registers. The transfer gate also controls the exposure time for the sensing elements and permits entry of charge to the End-Of-Scan (EOS) shift registers creating the end-of-scan waveform.

Four 879/1039-Bit Analog Shift Registers — Two on each side of the line of image sensor elements and separated from it by the transfer gate. The two inside registers, called the transport shift registers, are used to move the image generated charge packets delivered by the transfer gate serially to the charge-detector/amplifier. The complementary phase relationship of the last elements of the two transport shift registers provides for alternate delivery of

charge-packets to establish the original serial sequence of the line of video in the output circuit. The outer two registers serve to deliver the end-of scan waveform and reduce peripheral electron noise in the inner shift registers.

Gated Charge-Detector/Amplifier — Charge-packets are transported to a precharged diode whose potential changes linearly in response to the quantity of the signal charge delivered. This potential is applied to the gate of an n-channel MOS transistor producing a signal which passes through the sample-and-hold gate to the output at VIDEOout. The sample-and-hold gate is a switching MOS transistor in the output amplifier that allows the output to be delivered as a sampled-and-held waveform. A reset transistor is driven by the Reset Clock (ϕ_R) and recharges the charge-detector diode capacitance before the arrival of each new signal charge-packet from the transport registers.

Clock Driver Circuitry — Allows the CCD122/142 to be operated using only three external clocks, (1) a Reset Clock signal which controls the integrated output signal amplifier, (2) a square wave Transport Clock which operates at half the reset clock frequency and controls the readout rate of video data from the sensor, and (3) a Transfer Clock pulse which controls exposure time of the sensor. The external clocks should be able to supply TTL level power.

Dark and White Reference Circuitry — Four additional sensing elements at both ends of the 1728/2048 array are covered by opaque metalization. They provide a dark (no illumination) signal reference which is delivered at both ends of the line of video ouptut representing the illuminated 1728/2048 sensor elements (labelled "D" in the block diagram). Also included at one end of the 1728/2048 sense element array is a white signal reference level generator which likewise provides a reference in the output signal (labelled "W" in the block diagram). These reference levels are useful as inputs to external DC restoration and/or automatic gain control circuitry.

DEFINITION OF TERMS:

Charge-Coupled Device — A charge-coupled device is a semiconductor device in which finite isolated charge-packets are transported from one position in the semiconductor to an adjacent position by sequential clocking of an array of gates. The charge-packets are minority carriers with respect to the semiconductor substrate.

Transfer Clock ϕ_X — The voltage waveform applied to the transfer gate to move the accumulated charge from the image sensor elements to the CCD transport shift registers.

Transport Clock ϕ_T — The clock applied to the gates of the CCD transport shift registers to move the charge-packets received from the image sensor elements to the gated charge-detector/amplifier.

Gated Charge-Detector/Amplifier — The output circuit of the CCD122/142 which receives the charge-packets from the CCD transport shift registers and provides a signal voltage proportional to the size of each charge-packet received. Before each new charge-packet is sensed, a reset clock returns the charge-detector voltage to a fixed base level.

Reset Clock ϕ_R — The voltage waveform required to reset the voltage on the charge-detector.

Sample-and-Hold Clock ϕ_{SH} — An internally supplied voltage waveform applied to the sample-and-hold gate in the amplifier to create a continuous sampled video signal at the output. The sample-and-hold feature can be defeated by connecting ϕ_{SH} to V_{DD}.

Dark Reference — Video output level generated from sensing elements covered with opaque metalization providing a reference voltage equivalent to device operation in the dark. Permits use of external dc restoration circuitry.

White Reference — Video output level generated by on-chip circuitry providing a reference voltage permitting external automatic gain control circuitry to be used. The reference voltage is produced by charge-injection under the control of the electrical input bias voltage (V_{EI}). The amplitude of the reference is typically 70% of the saturation output voltage.

Isolation Cell — A site on-chip producing an element in the video output that serves as a buffer between valid video data and dark and white reference signals. The output from an isolation cell contains no valid video information and should be ignored.

Dynamic Range — The saturation exposure divided by the peak-to-peak noise equivalent exposure. (This does not take into account any dark signal components.) Dynamic range is

FAIRCHILD
A Schlumberger Company

CCD

sometimes defined in terms of rms noise. To compare the two definitions a factor of four to six is generally appropriate in that peak-to-peak noise is approximately equal to four to six times rms noise.

Peak-to-Peak Noise Equivalent Exposure — The exposure level which gives an output signal equal to the peak-to-peak noise level at the output in the dark.

Saturation Exposure — The minimum exposure level that will produce a saturated output signal. Exposure is equal to the light intensity times the photosite integration time.

Charge Transfer Efficiency — Percentage of valid charge information that is transferred between each successive stage of the transport registers.

Spectral Response Range — The spectral band in which the response per unit of radiant power is more than 10% of the peak response.

Responsivity — The output signal voltage per unit exposure for a specified spectral type of radiation. Responsivity equals output voltage divided by exposure level.

Dark Signal — The output signal in the dark caused by thermally generated electrons which is a linear function of integration time and highly sensitive to temperature. (See accompanying photos for details of definition.)

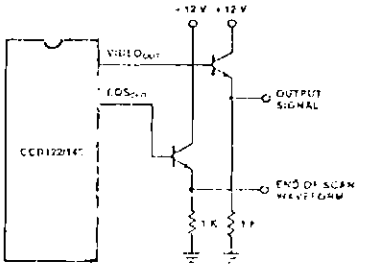
Total Photoresponse Non-Uniformity — The difference of the response levels between the most and least sensitive elements under uniform illumination. (See accompanying photos for details of definition.)

Saturation Output Voltage — The maximum usable signal output voltage, measured from the zero reference level. (See timing diagram.) Any photoelement whose video output < saturation output voltage has an in-spec charge transfer efficiency (CTE). CTE will be below the specification if the video output ≥ saturation output voltage.

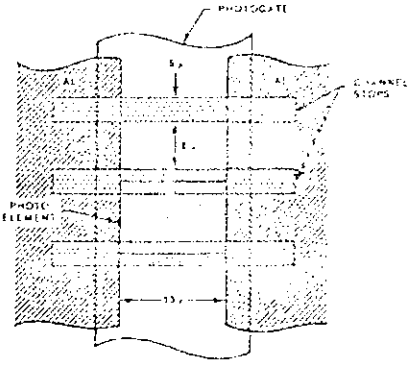
Integration Time — The time interval between the falling edges of any two successive transfer pulses ex as shown in the timing diagram. The integration time is the time allowed for the photosites to collect charge.

Pixel — Picture element (photosite).

TEST LOAD CONFIGURATION



PHOTOELEMENT DIMENSIONS



All dimensions are typical values

FAIRCHILD • CCD122/142

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Above which useful life may be impaired)

Storage Temperature		−25°C to +125°C
Operating Temperature (See curves)		−25°C to +70°C
CCD122:	Pins 1, 4, 9, 10, 11, 13, 14, 16, 22, 23	−0.3 V to 15 V
	Pins 5, 12, 17, 24	0 V
	Pins 2, 3, 6, 7, 8, 15, 18, 19, 20, 21	NC
CCD142:	Pins 2, 5, 10, 11, 12, 16, 17, 19, 25, 26	−0.3 V to 15 V
	Pins 6, 13, 14, 15, 20, 27, 28	0 V
	Pins 1, 3, 4, 7, 8, 9, 18, 21, 22, 23, 24	NC

CAUTION NOTE: These devices have limited built-in gate protection. It is recommended that static discharge be controlled and minimized. Care must be taken to avoid shorting pins VIEEOUT and EOSOUT to VSS or VDD during operation of the devices. Shorting these pins temporarily to VSS or VDD may destroy the output amplifiers.

DC CHARACTERISTICS: T_A = 25°C (Note 1)

SYMBOL	CHARACTERISTIC	RANGE			UNITS	CONDITIONS
		MIN	TYP	MAX		
V_{DD}	Clock Driver Drain Supply Voltage	12.0	13.0	14.0	V	
I_{DD}	Clock Driver Drain Supply Current		6.9	12.5	mA	
V_{OD}	Output Amplifier Drain Supply Voltage	12.0	13.0	14.0	V	
I_{OD}	Output Amplifier Drain Supply Current		6.9	12.5	mA	
V_{PG}	Photogate Bias Voltage	6.5	7.0	7.5	V	
V_1	DC Electrode Bias Voltage	4.5	5.0	5.5	V	Note 2
V_{EI}	Electrical Input Bias Voltage		11.4		V	Note 3
V_{SS}	Substrate (Ground)		0.0		V	

AC CHARACTERISTICS: (Note 1)

T_A = 25°C, f_{CR} = 0.5 MHz, t_{INT} = 10 ms, light source = 2854°K + 3.0 mm thick Corning 1.75 IR absorbing filter. All operating voltages nominal specified values.

SYMBOL	CHARACTERISTIC	RANGE			UNITS	CONDITIONS
		MIN	TYP	MAX		
DR	Dynamic Range					
	(relative to peak-to-peak noise)	250:1	500:1			Note 9
	(relative to rms noise)	1250:1	2500:1			
NEE	RMS Noise Equivalent Exposure		0.0002		μlux-s	Note 10
SE	Saturation Exposure		0.4		μlux-s	Note 11
CTE	Charge Transfer Efficiency		0.999995			Note 12
V_O	Output DC Level	3.0	5.5	10.0	V	
Z	Output Impedance		1.4	3.0	kΩ	
P	On Chip Power Dissipation					
	Clock Drivers		90	150	mW	
	Amplifiers		90	150	mW	
N	Peak to Peak Noise		2.0		mV	

FAIRCHILD
A Schlumberger Company

CCD

FAIRCHILD • CCD122/142

CLOCK CHARACTERISTICS: T_P = 25°C (Note 1)

SYMBOL	CHARACTERISTIC	RANGE			UNITS	CONDITIONS
		MIN	TYP	MAX		
$V_{\phi TL}$	Transport Clock LOW	0.0	0.3	0.5	V	Notes 4, 5
$V_{\phi TH}$	Transport Clock HIGH	9.75	10.0	10.5	V	Note 5
$V_{\phi XL}$	Transfer Clock LOW	0.0	0.3	0.5	V	Notes 4, 6
$V_{\phi XH}$	Transfer Clock HIGH	9.75	10.0	10.5	V	Note 6
$V_{\phi RL}$	Reset Clock LOW	0.0	0.3	0.5	V	Note 7
$V_{\phi RH}$	Reset Clock HIGH	9.75	10.0	10.5	V	Note 7
f_{OR}	Maximum Reset Clock Frequency (Output Data Rate)	1.0	2.0		MHz	Note 8

PERFORMANCE CHARACTERISTICS: (Note 1)

T_P = 25°C, f_{OR} = 0.5 MHz, t_{INT} = 10 ms, light source = 2854°K + 3.0 mm thick Corning 1-75 IR-absorbing filter. All operating voltages nominal specified values.

SYMBOL	CHARACTERISTIC	RANGE			UNITS	CONDITIONS
		MIN	TYP	MAX		
PRNU*	Photoresponse Non-uniformity					
	Peak-to-Peak		160	210	mV	Note 16
	Peak-to-Peak without Single Pixel Positive and Negative Pulses		100		mV	Note 16
	Single-pixel Positive Pulses		85		mV	Note 16
	Single-pixel Negative Pulses		130		mV	Note 16
	Register Imbalance ("Odd"/"Even")		20		mV	Note 16
DS	Dark Signal					
	DC Component		5	15	mV	Notes 13, 14
	Low Frequency Component		5	10	mV	Notes 13, 14
SPDSNU	Single pixel DS Non-uniformity		20	40	mV	Notes 13, 15
R	Responsivity	2.0	3.5	5.0	Volts per μJ/cm²	Note 17
V_{SAT}	Saturation Output Voltage	800	1400	1600	mV	Note 18

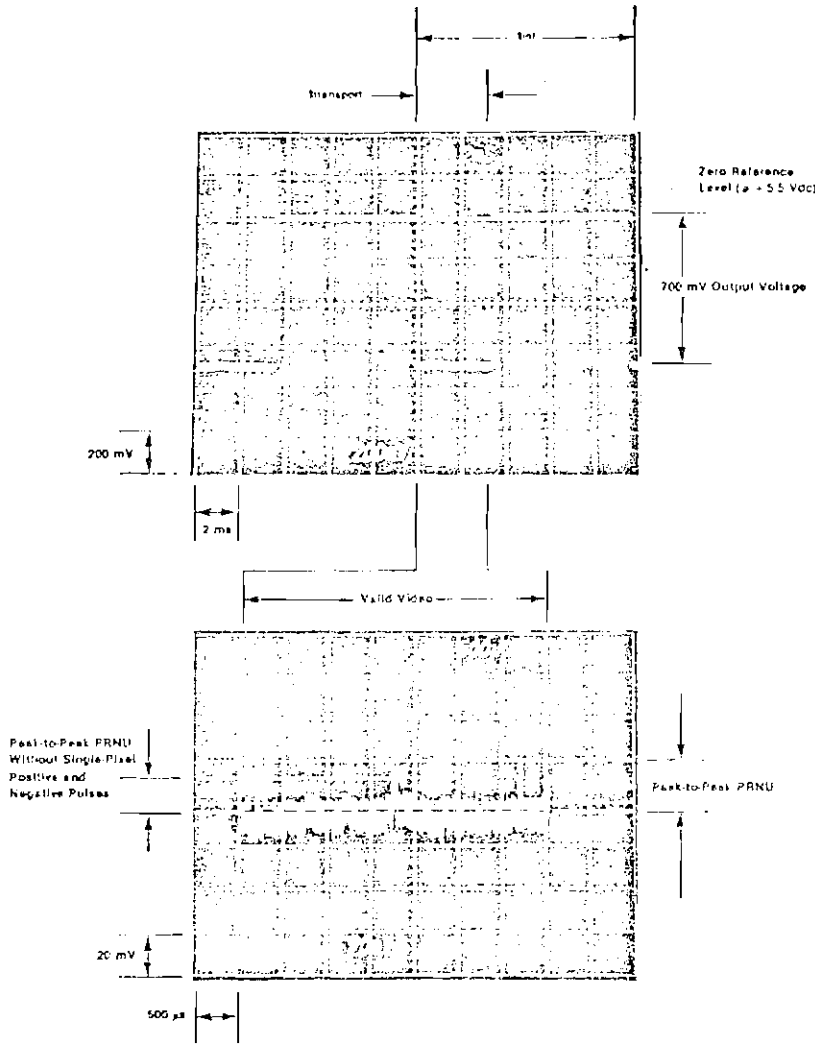
*All PRNU Measurements taken at a 700 mV output level using an f/2.5 lens and excluded the outputs from the first and last elements of the array. The "F" number is defined as the distance from the lens to the array divided by the diameter of the lens aperture. As the F number increases, the resulting more highly collimated light causes the package window aberrations to dominate and increase PRNU. A lower f number results in less collimated light causing device photosite blemishes to dominate the PRNU.

NOTES:

1. T_P is defined as the package temperature.
2. V_T should be equal to (1/2) $V_{\phi TH}$.
3. V_{TI} is used to generate the end-of-scan output and the white reference output. These two signals can be eliminated by connecting V_{TI} to a voltage level equal to $V_{\phi RH}$ + 5 V.
4. Negative transients on any clock pin going below 0.0 V may cause charge-injection which results in an increase of apparent DS.
5. $C_{\phi T}$ = 700 pF
6. $C_{\phi X}$ = 300 pF
7. $C_{\phi R}$ = 5 pF
8. Minimum clock frequency is limited by increase in dark signal.
9. Dynamic range is defined as V_{SAT}/peak-to-peak (temporal) or V_{SAT}/rms noise.
10. 1 μJ/cm² = 0.02 lux at 2854°K. 1 lux = 50 μJ/cm² at 2854°K.
11. SE for 2854°K tungsten light without 3.0 mm thick Corning 1-75 IR absorbing filter is typically 0.5 μJ/cm².
12. CTE is the measurement for a one-step transfer.
13. See photographs for DS definitions.
14. Dark signal component approximately doubles for every 5°C increase in T_P.
15. Each SPDSNU is measured from the DS level adjacent to the base of the SPDSNU. The SPDSNU approximately doubles for every 8°C increase in T_P.
16. See photographs for PRNU definitions.
17. Responsivity for 2854°K light source without 3.0 mm thick Corning 1-75 IR-absorbing filter is typically 2 V per μJ/cm².
18. See test load configurations.

FAIRCHILD • CCD122/142

PHOTORESPONSE NON-UNIFORMITY PARAMETERS (PRNU)



TEST CONDITIONS

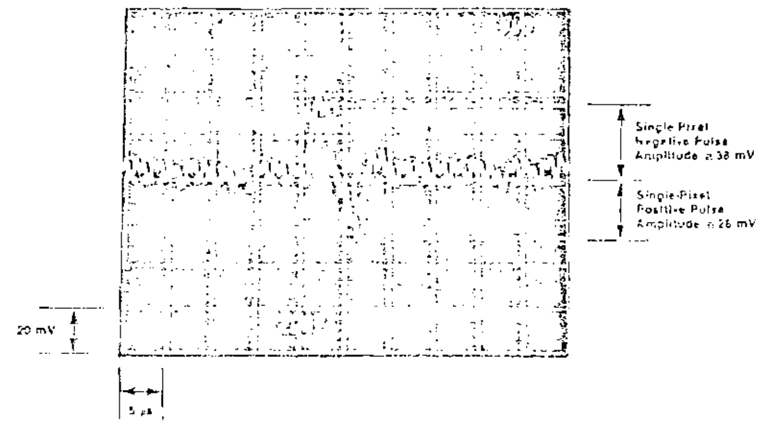
T_P = +25°C, t_{AP} = 0.5 V/µs, t_{INT} = 10.0 ms, all voltages nominal spec sheet values. Illumination: 2854°K source with a 2.0 ism thick Corning 1-75 (Heat Absorbing Filter). PRNU measurements taken at an output voltage of 700 mV.

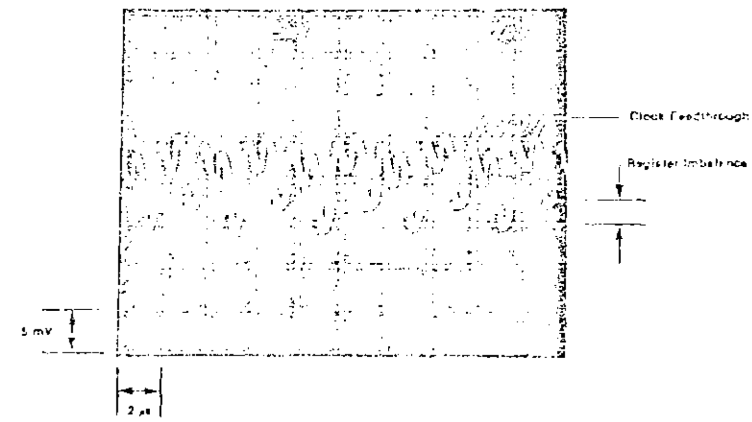
FAIRCHILD
A Schlumberger Company

CCD

FAIRCHILD • CCD122/142

PRNU PARAMETERS (CONTINUED)



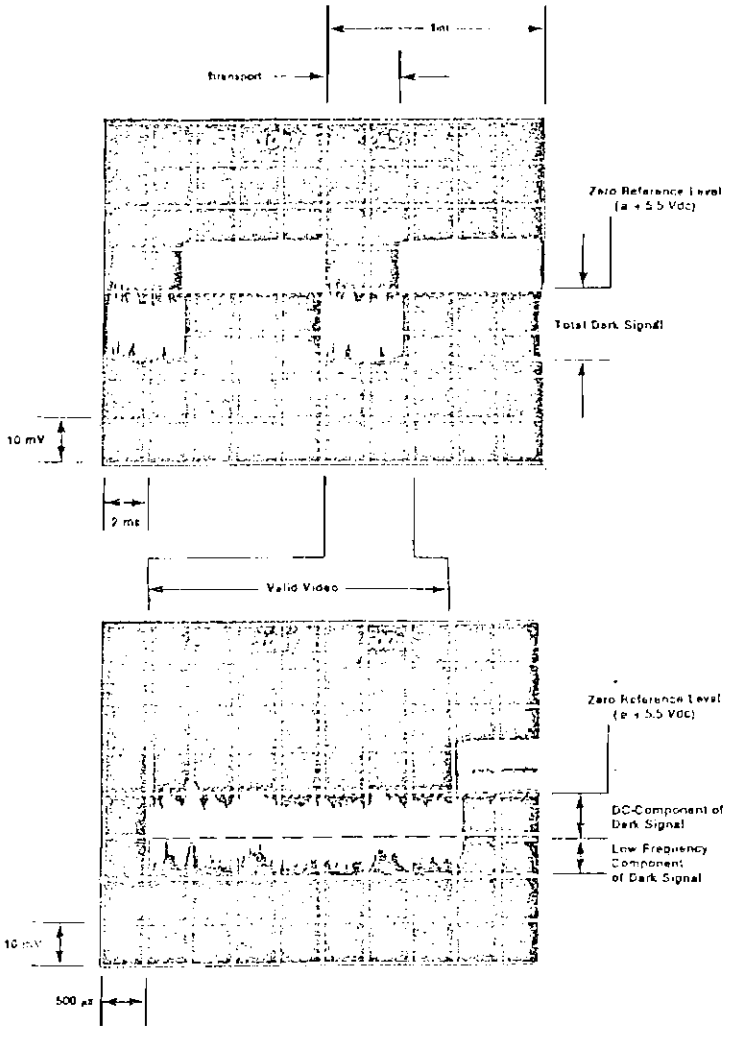


TEST CONDITIONS

T_A = +25°C, $f_{\phi R}$ = 0.5 MHz, t_{int} = 10.0 ms, all voltages nominal spec sheet values. Illumination: 2854°K source with a 3.0 mm thick Corning 1-75 IR absorbing filter. PRNU measurements taken at an output voltage of 700 mV.

FAIRCHILD • CCD122/142

DARK SIGNAL PARAMETERS (DS)



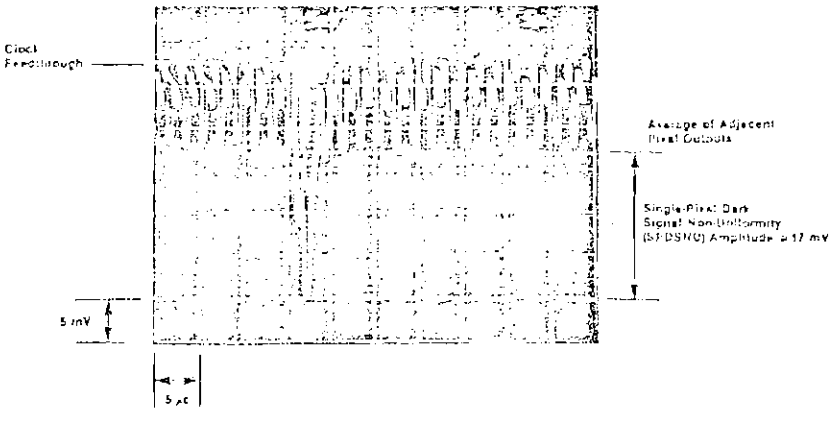
TEST CONDITIONS
T_ϕ ≙ +25°C, f_{xA} = 0.5 MHz, tint = 10.0 ms, all voltages nominal specified values

FAIRCHILD
A Schlumberger Company

CCD

FAIRCHILD • CCD122/142

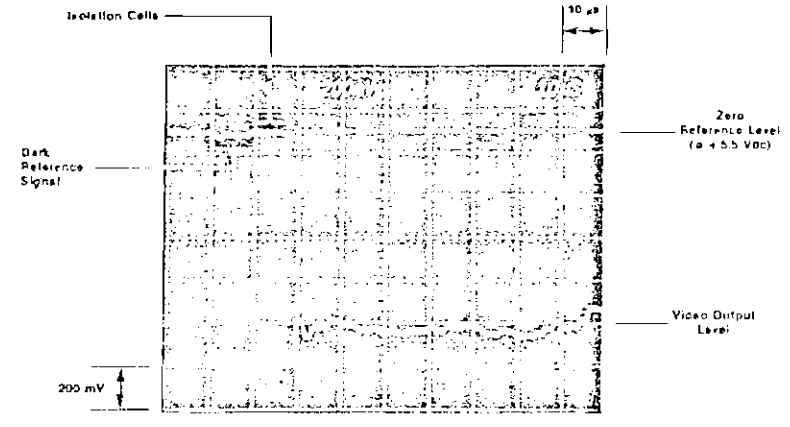
DS PARAMETERS (CONTINUED)



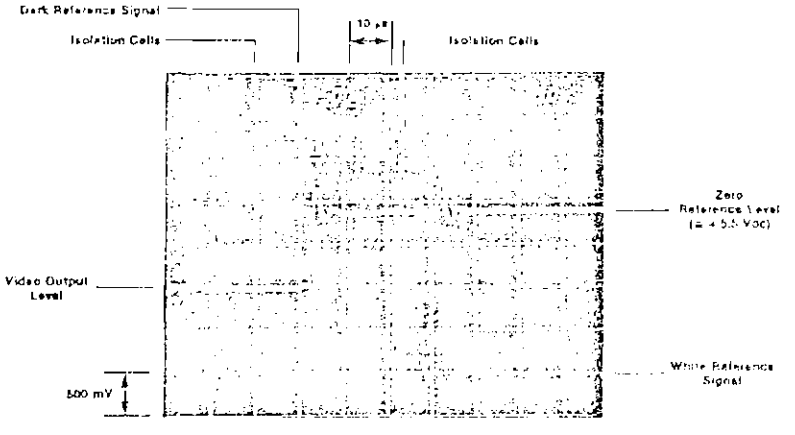
TEST CONDITIONS

FAIRCHILD • CCD122/142

VIDEO OUPUT TIMING PHOTOGRAPHS



START OF ONE SCAN VIDEO OUTPUT



END OF ONE SCAN VIDEO OUTPUT

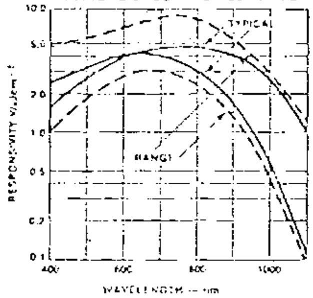
TEST CONDITIONS

T_P = +25°C, f_{HP} = 0.5 MHz, t_{INT} = 10 ms, all voltages nominal spec-sheet values. Illumination: 3200°K source with a 5.0 mm thick Corning 1-75 IR absorbing filter. PRNU measurements taken at an output voltage of 700 mV.

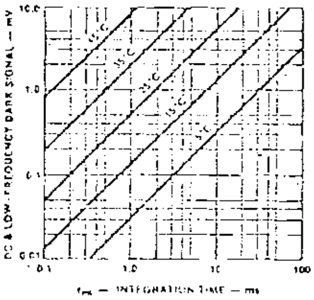
FAIRCHILD • CCD122/142

TYPICAL PERFORMANCE CURVES

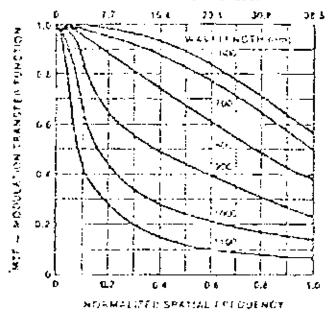
TYPICAL SPECTRAL RESPONSE



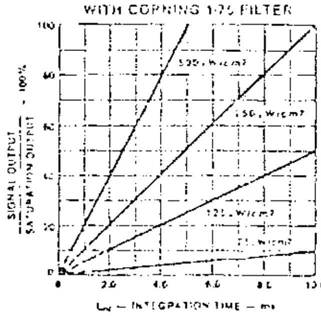
DC AND LOW-FREQUENCY DARK SIGNAL VERSUS INTEGRATION TIME



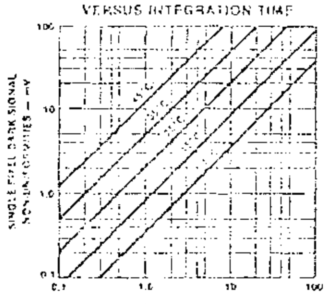
MODULATION TRANSFER FUNCTIONS FOR NARROW BAND ILLUMINATION SOURCES



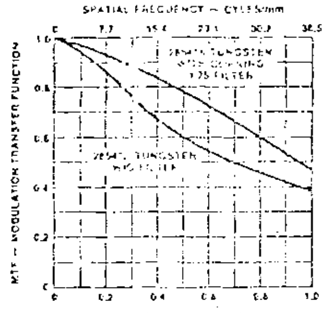
OUTPUT SIGNAL LEVEL VERSUS INTEGRATION TIME 2854°K TUNGSTEN SOURCE WITH CORNING 1-75 FILTER



SINGLE-PIXEL DARK SIGNAL NON-UNIFORMITIES VERSUS INTEGRATION TIME



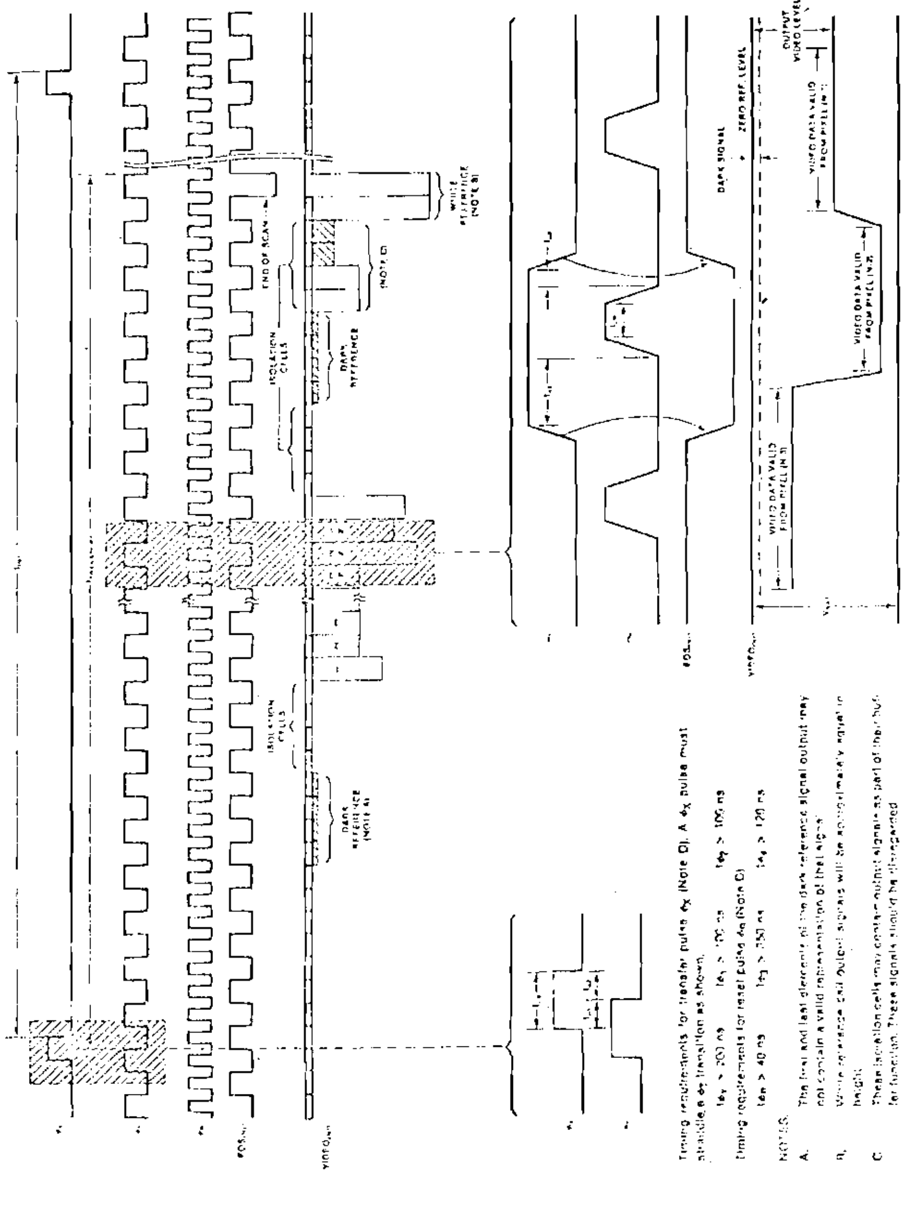
MODULATION TRANSFER FUNCTIONS FOR TWO BROADBAND ILLUMINATION SOURCES



The Corning 1-75 filter has the following typical transmittance spectral characteristics: >85% at <500 nm, 60% at 700 nm, [illegible] 5% at 900 nm and <2% at >1000 nm.

FAIRCHILD • CCD122/142

TIMING DIAGRAM DRIVE SIGNALS



Timing requirements for transfer pulse ϕ_X (Note D). A ϕ_X pulse must straddle a ϕ_2 transition as shown.

$t_{\phi X} > 200$ ns $t_{\phi 1} > 100$ ns $t_{\phi 2} > 100$ ns

Timing requirements for reset pulse ϕ_R (Note D)

$t_{\phi R} > 40$ ns $t_{\phi 3} > 250$ ns $t_{\phi 4} > 120$ ns

NOTES.

A. The first and last elements of the dark reference signal output may not contain a valid representation of that signal.

B. White reference cell output signals will be approximately equal in height.

C. These isolation cells may contain output signals as part of their buffer function. These signals should be disregarded.

D. Recommended rise and fall times for all clocks are that they are ≥ 20 ns.

FAIRCHILD
A Schlumberger Company

CCD

FAIRCHILD • CCD122/142

DEVICE CARE AND OPERATION:

Glass may be cleaned by saturating a cotton swab in alcohol and lightly wiping the surface. Rinse off the alcohol with de-ionized water. Allow the glass to dry preferably by blowing with filtered dry N_2 or air.

It is important to note in design and applications considerations that the devices are very sensitive to thermal conditions. The dark signal DC and low frequency components approximately double for every 5°C temperature increase and single-pixel dark signal non-uniformities approximately double for every 8°C temperature increase. The devices may be cooled to achieve very long integration times and very low light level capability.

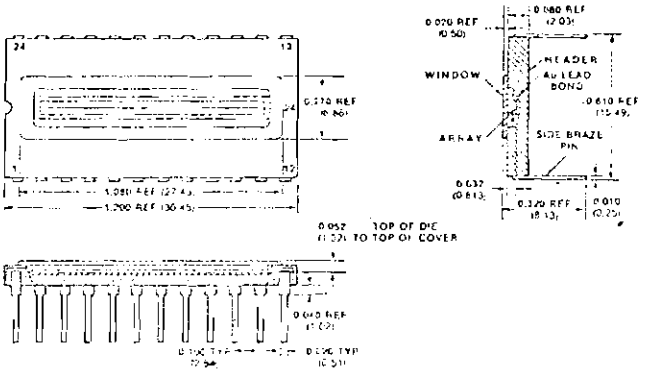
ORDER INFORMATION — Order CCD122DC where "D" stands for a ceramic package and "C" for commercial temperature range.

The pins on the CCD122DC and the CCD142DC are arranged to allow the 24-pin CCD122DC to be placed in a 28 pin CCD142DC socket. To do so, the CCD122DC is positioned in the center of the 28-pin socket such that Pin 1 of the device aligns with Pin 2 of the socket and Pin 12 of the device with Pin 13 of the socket.

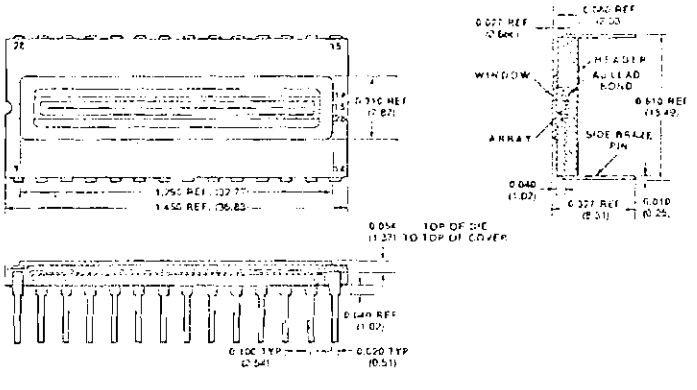
Also available are printed circuit boards that include all the necessary clocks, logic drivers and video amplifiers to operate the CCD122DC or CCD142DC. The boards are fully assembled and tested and require only one power supply for operation (+15 V). The printed circuit board order codes are: CCD122DB, CCD142DB. For further information on the boards please call your nearest Fairchild sales office. For any technical assistance, call (415) 493-8001.

FAIRCHILD • CCD122/142

CCD122DC PACKAGE OUTLINE
24-Pin Dual In-line Ceramic Package



CCD142DC PACKAGE OUTLINE
28-Pin Dual In-line Ceramic Package



NOTES:
All dimensions in inches (bold) and millimeters (parenthesis). Header is black ceramic (Al_2O_3). Window is glass. The [illegible] of the device is indicated near the notched end of the package.

APÊNDICE C

GLOSSÁRIO

Apresenta-se o significado de alguns termos técnicos utilizados neste trabalho.

- *CCD*: do inglês, "Charge Coupled Device" (dispositivo de cargas acopladas).

- *Esfera Integradora*: dispositivo ótico que produz à sua saída um feixe de radiação de intensidade uniforme.

- *Exposição Equivalente de Ruído (NEE)*: é o nível de exposição (intensidade x tempo) que produz na saída do CCD um sinal igual ao nível de ruído.

- *Faixa Dinâmica*: exposição de saturação dividida pela exposição equivalente de ruído no escuro.

- *Função de Transferência de Modulação (FTM)*: representa a resolução espacial do sistema óptico.

- *Monocromador*: instrumento utilizado para produzir um feixe de radiação monocromática a partir de uma fonte policromática.

- *Pixel*: elemento de imagem.

- *Radiômetro*: instrumento que coleta radiação em uma dada faixa espectral determinando a sua intensidade.

- *Relação Sinal/Ruído*: é o nível de sinal dividido pelo nível de ruído na saída do CCD.

- *Sensibilidade*: é o nível de sinal dividido pela exposição.