

Fernando Luís Rodrigues Duarte Bexiga

Astrofotografia Digital com Detectores CCD



Departamento de Matemática Aplicada
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Dezembro / 1999

Fernando Luís Rodrigues Duarte Bexiga

Astrofotografia Digital com Detectores CCD



*Tese submetida à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
para obtenção do grau de Mestre em Ensino da Astronomia*

Departamento de Matemática Aplicada
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Dezembro / 1999

À minha filha, Maria Miguel.

Que a tua geração possa ainda apreciar a beleza dos céus e observar realizações e maravilhas hoje inimaginadas.

A todos os professores que lutam por condições dignas para o ensino experimental e por uma divulgação séria das Ciências.

A todos os alunos deslumbrados com as maravilhas da Natureza e do Conhecimento. Para que os seus olhos possam brilhar enquanto a Ciência acontece.

Fernando Luís Bexiga

Dezembro de 1999

Agradecimentos:

Quero exprimir o meu reconhecimento ao orientador desta tese, Dr. Filipe Gameiro, pelo modo como me soube motivar para a sua realização, por todo o apoio prestado na elaboração e revisão do texto e pela compreensão e paciência que revelou perante a minhas dúvidas e dificuldades.

Agradeço aos meus colegas do Curso de Mestrado a camaradagem, a amizade e todo o apoio que sempre me dispensaram.

Agradeço ao Conselho Executivo da Escola Secundária da Sertã a disponibilização de instalações e recursos sem a qual este trabalho não teria sido possível, bem como à sua Presidente, Maria Glória Santos, pelo apoio, amizade e confiança que sempre manifestou.

O meu sincero obrigado a todos os alunos que se dispuseram a me assistir no desenvolvimento de actividades experimentais e sessões de observação.

Pelas intermináveis horas que ficaram privadas da minha disponibilidade e companhia, pelo apoio prestado nos momentos de desmotivação e pelo amor que me dedicam, o meu profundo agradecimento à minha esposa, Cristina, e à minha filha, Maria Miguel, a quem não pude dispensar toda a atenção que merecia durante o seu primeiro ano de vida.

Fernando Luís Bexiga

Dezembro de 1999

Prefácio sobre o autor:

O autor desta tese, Fernando Luís Bexiga, licenciou-se em Engenharia Electrotécnica no Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, em 1980. Após ter prestado serviço docente naquele Instituto, primeiro como Monitor e posteriormente como Assistente Estagiário, optou por ingressar no mundo empresarial, tendo exercido a profissão de engenheiro sucessivamente na Centrel – E.I.D., Delta C / Texas Instruments e T. A. P.

A partir de 1888 regressou à docência no Ensino Secundário, tendo realizado a profissionalização em exercício em 1990 na Escola Superior de Educação de Castelo Branco. Desde essa altura, tem vindo a prestar serviço docente na Escola Secundária da Sertã, onde lecciona as disciplinas de formação técnica dos Cursos Tecnológicos de Electrotecnia e Electrónica e de Informática e cumpriu um mandato como Presidente do Conselho Directivo.

Esporadicamente tem prestado colaboração como docente das disciplinas do Curso Tecnológico Informática no Instituto Vaz Serra (Cernache do Bonjardim - Sertã) e no Curso Tecnológico de Informática de Manutenção na Escola Tecnológica e Profissional da Zona do Pinhal (Pedrogão Grande), bem como formador em acções de formação contínua no âmbito do programa “FOCO” e em cursos técnicos promovidos pelo Centro de Emprego da Sertã.

Na sua actividade tem colaborado activamente nos projectos relativos à introdução das novas tecnologias e implementação do ensino experimental das Ciências em ambiente escolar, nomeadamente “Projecto Minerva” e “Ciência-Viva”, sendo responsável pela criação e dinamização do Clube de Astronomia da Escola Secundária da Sertã.

Resumo

O presente trabalho pretende discutir a aplicação dos detectores CCD em Astronomia, estudando o princípio de funcionamento dos detectores e inferindo as características de uma câmara CCD e respectivo desempenho. Pretende, ainda, descrever os aspectos construtivos e compreender a operação destas câmaras na especificidade da aplicação em Astronomia, nomeadamente nas fases de aquisição e posterior tratamento digital de imagem. É realizada uma abordagem de carácter experimental á construção e estudo de câmaras CCD reais e ao seu desempenho operacional em actividades de divulgação da Astronomia, com o objectivo de explorar a viabilidade de execução de projectos tecnológicos promotores de interdisciplinaridade em contexto escolar. Deste modo, privilegia-se a experimentação em detrimento do saber teórico, a desenvolver no âmbito de um projecto de Área-escola ou das actividades de um Clube de Ciência ou Tecnologia ao nível do Ensino Secundário, em virtude de apelar ao desenvolvimento de inúmeras aptidões manuais e competências técnicas, e gerar sinergias motivadoras à aprendizagem das Ciências.

Abstract

The actual thesis is meant to discuss the application of CCD detectors in Astronomy, while studying its working principles and the characteristics of a CCD camera and its own performance; is, also, meant to describe the constructive aspects and to understand the functioning of these cameras in specific application to Astronomy, namely the phases of acquisition and posterior digital treatment of images. An experimental approach is made both to the fitting and study of real CCD cameras and their operational performance in astronomical revealing activities. It aims to explore the practicability of making projects which can promote interdisciplinary tasks in school context, putting more emphasis in experimentation than in theoretical knowledge, and can be applied in project work or in extra-curricular activities, like Science or Technology Clubs in secondary level, as it calls for the development of innumerable manual capacities and technical competencies, and generates motivating synergies leading to science learning.

Résumé

Ce travail prétend analyser l'application des détecteurs CCD dans l'Astronomie, en étudiant le principe de fonctionnement des détecteurs et en induisant les caractéristiques d'une caméra CCD ainsi que sa respective exécution. Il prétend encore décrire les aspects constructifs et comprendre l'engrenage de ces caméras dans leur spécificité de l'application en Astronomie, notamment dans ses phases d'acquisition et postérieur traitement digital d'image. Un abordage de caractère expérimental à la construction et à l'étude des caméra CCD réelles est réalisé ainsi que celui à son exécution opérationnelle dans les activités de divulgation de l'Astronomie ayant pour objectif explorer la viabilité de fonctionnement de projets technologiques promoteurs de l'interdisciplinarité dans le contexte scolaire. On privilégie ainsi l'expérimentation en détriment du savoir théorique à appliquer dans le context d'un projet de groupe ou des activités d'un Club de Science ou de Technologie au niveau de l'Enseignement Secondaire en vertu de faire appel au développement d'innombrables aptitudes manuelles et de compétences techniques puis de gérer des synergies impulsives à la motivation de l'apprentissage des Sciences.

INDICE

Agradecimentos.....	3.
Prefácio sobre o autor.....	4.
Resumos.....	5..
Índice	7..
1. INTRODUÇÃO	10
2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM DETECTOR CCD.....	13
2.1. CONDENSADOR MOS.....	14
2.1.1. Portadores de carga.....	15
2.1.2. Armazenamento de carga.....	16
2.1.3. "Dark Current".....	17
2.2. MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA.....	17
2.2.1. Transferência de tripla fase.....	18
2.2.2. Transferência de dupla fase.....	19
2.2.3. Qualidade de transferência.....	20
2.3. ANDAR DE SAÍDA.....	21
2.4. OS FOTOELEMENTOS.....	22
2.4.1. Iluminação frontal (Frontside CCD's).....	23
2.4.2. Iluminação de retaguarda (Backside CCD's).....	24
2.5. ORGANIZAÇÃO DE UM CCD.....	25
2.5.1. "Interline transfer array".....	25
2.5.2. "Frame transfer array".....	26
2.6. OUTROS ASPECTOS TECNOLÓGICOS.....	28
2.6.1. Capacidade de um Fotoelemento – "Well Depth".....	28
2.6.2. Saturação – "Anti – Blooming Gates".....	29
2.6.3. "Binning".....	30
2.6.4. Pixels defeituosos.....	31
2.6.5. Tecnologia MPP.....	32
3. CARACTERÍSTICAS GENÉRICAS DE UM DETECTOR CCD.....	33
3.1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	34
3.1.1. Forma dos pixels.....	34
3.1.2. Dimensões dos pixels – Resolução da imagem.....	35

3.1.3.	Superfície sensível total do detector – Campo de visão	38
3.1.4.	Escolha da combinação óptica óptima	39
3.2.	QUALIDADE DE UM DETECTOR CCD.....	42
3.2.1.	Eficiência quântica.....	42
3.2.2.	Resposta espectral.....	44
3.2.3.	Linearidade	45
3.2.4.	Ruído e Relação Sinal – Ruído.....	47
3.3.	ELECTRÓNICA DE UMA CÂMARA CCD.....	55
3.4.	ASPECTOS TÉRMICOS – ARREFECIMENTO.....	59
3.5.	ASPECTOS MECÂNICOS.....	61
4.	CONSTRUÇÃO E ESTUDO COMPARATIVO DE CÂMARAS CCD.....	62
4.1.	CONSTRUÇÃO DE UMA CÂMARA “COOKBOOK CB245”.....	64
4.1.1.	Projecto Geral da Câmara.....	65
4.1.2.	O Detector CCD TC245	66
4.1.3.	Fonte de Alimentação	76
4.1.4.	Electrónica da Câmara.....	82
4.1.5.	Corpo da Câmara	95
4.1.6.	Sistema de Refrigeração.....	104
4.1.7.	“Software” de Controlo	107
4.1.8.	Ajustes Finais	116
4.2.	ADAPTAÇÃO DE UMA CÂMARA DE VIDEOCONFERÊNCIA (“CONNECTRIX QUICKCAM”) A APLICAÇÕES ASTRONÓMICAS.....	119
4.2.1.	O Detector CCD TC255P.....	121
4.2.2.	Desmontagem da Câmara “Connectrix QuickCam”.....	124
4.2.3.	Adaptação ao Telescópio.....	127
4.2.4.	Comunicação com o Computador e “Software” de Controlo.....	129
4.3.	ANÁLISE DA CÂMARA COMERCIAL “STARLIGHT XPRESS MX916”.....	134
4.3.1.	Características Gerais.....	134
4.3.2.	O Detector CCD “SONY ICX083AL”	136
4.3.3.	“Software” de Controlo	138
4.4.	ESTUDO COMPARATIVO DAS CÂMARAS.....	143
4.4.1.	Características Geométricas.....	143
4.4.2.	Eficiência Quântica.....	145
4.4.3.	Ensaios	147

5. TÉCNICAS DE OBSERVAÇÃO COM CÂMARAS CCD.....	154
5.1. TELESCÓPIO	157
5.1.1. Características do subsistema óptico.....	158
5.1.2. Tipo de Montagem e Subsistema Mecânico.....	164
5.1.3. Técnicas de Alinhamento Polar	170
5.2. ACOPLAMENTO DA CÂMARA AO TELESCÓPIO.....	177
5.2.1. Adaptação mecânica.....	177
5.2.2. “Flip-mirror” - Pesquisa e Centragem do Objecto.....	179
5.3. AQUISIÇÃO DE IMAGEM.....	183
5.3.1. Focagem.....	184
5.3.2. Guiamento da exposição.....	187
5.3.3. Sistemas Ópticos Acessórios.....	189
5.4. CALIBRAGEM DAS IMAGENS	192
5.4.1. “Dark Frames”	194
5.4.2. “Flat Fields”.....	195
5.4.3. Exposições múltiplas:.....	198
5.5. SESSÃO DE OBSERVAÇÃO E AQUISIÇÃO DE IMAGEM.....	199
6. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM.....	201
6.1. “SOFTWARE” DE TRATAMENTO DIGITAL DE IMAGENS.....	204
6.2. CONTROLO DE BRILHO E CONTRASTE – HISTOGRAMAS.....	205
6.3. FILTROS	208
7. CONCLUSÃO.....	210
APÊNDICE I	213
Lista de Referências Bibliográficas.....	217

- CAPÍTULO 1 -

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Os dispositivos CCD (“Charge-Coupled Devices”) foram desenvolvidos pelos “Bell Laboratories” a partir do início da década de 70, inicialmente como dispositivos de armazenamento de carga ou dados – memórias. Contudo a sua utilização como detectores ópticos, permitiu a construção de câmaras de vídeo a preços acessíveis (Camcorders) permitindo o seu lançamento no mercado da electrónica de consumo. Paralelamente, a sua utilização como sistemas de detecção óptica em Astronomia permitiu revolucionar a astrofotografia.

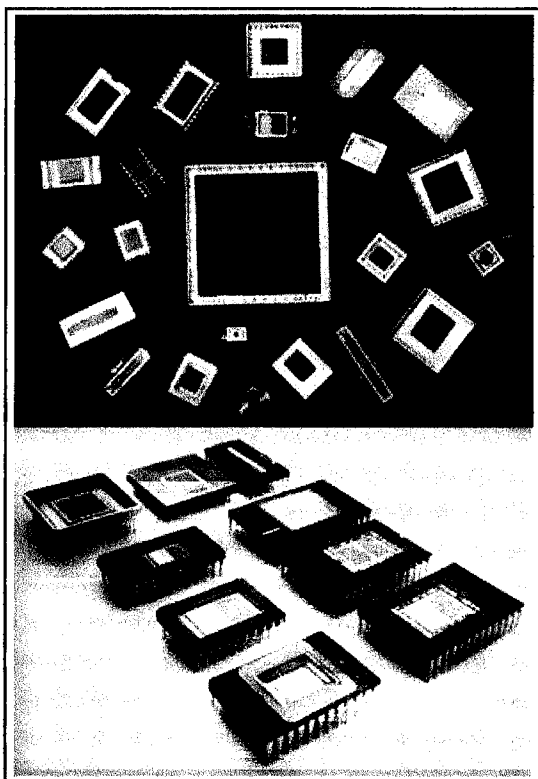


Figura 1.1 – Circuitos integrados detectores CCD.

De modo idêntico à chapa fotográfica, os detectores baseados em dispositivos CCD's têm a possibilidade de integrar a luz de objectos demasiado ténues para o olho humano, através de exposições prolongadas de vários minutos ou mesmo horas. Embora as emulsões fotográficas tenham evoluído extraordinariamente, apenas conseguem registar cerca de 3 a 5% da energia luminosa incidente, enquanto os CCD's captam à volta de 30 a 50%, representando um ganho em eficiência de dez vezes.

Por outro lado a maior linearidade e sensibilidade dos detectores CCD, comparativamente à emulsão fotográfica, permite a sua utilização de modo vantajoso tanto em fotometria como na aquisição de imagens de objectos mais ténues, tornando estes campos da astrofotografia acessíveis a equipamentos

amadores de baixo custo. Ainda, devido ao facto das imagens serem directamente obtidas na forma digital, o detector CCD associado a um computador abre a possibilidade da imagem ser tratada digitalmente, permitindo um vasto campo de possibilidades e aplicações até agora reservadas a equipamento profissional dispendioso.

Com este trabalho pretende-se discutir a aplicação dos detectores CCD em Astronomia, começando por estudar o princípio de funcionamento dos detectores, inferindo as características de uma câmara CCD e respectivo desempenho, discutir os aspectos construtivos e compreender a operação destas câmaras na especificidade da aplicação em Astronomia, nomeadamente nas fases de aquisição e posterior tratamento digital de imagem. Pretende-se ainda complementar este trabalho com o estudo experimental de câmaras CCD reais e do seu desempenho operacional em actividades de divulgação da Astronomia, explorando a viabilidade de execução de projectos tecnológicos promotores de interdisciplinaridade em contexto escolar, privilegiando a experimentação em detrimento do saber teórico, a aplicar no âmbito de um projecto de Área-escola ou das actividades de um Clube de Ciência ou Tecnologia ao nível do Ensino Secundário, em virtude de apelar ao desenvolvimento de inúmeras aptidões manuais, competências técnicas e científicas.

Para tal, no Capítulo 2 será estudado o princípio de funcionamento de um detector CCD e discutidos alguns aspectos tecnológicos relevantes.

No 3º Capítulo discutir-se-ão as características gerais que uma câmara equipada com detector CCD deverá apresentar, para utilização em aplicações de astrofotografia.

O Capítulo 4 será dedicado a relatar actividades e procedimentos de construção de uma câmara CCD a partir de um Kit experimental, de adaptação de uma câmara de videoconferência a aplicações de astrofotografia e ao estudo de uma câmara comercial especificamente desenhada para actividades amadoras em Astronomia, sendo ainda realizado um estudo experimental comparativo do desempenho das três câmaras.

No Capítulo 5 serão abordadas técnicas de observação astronómica com câmaras CCD e no Capítulo 6 será realizado um estudo introdutório a aspectos relativos ao processamento digital de imagem.

ASTROFOTOGRAFIA DIGITAL COM DETECTORES CCD

- CAPÍTULO 2 -

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE
UM DETECTOR CCD

2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM DETECTOR CCD

Os CCD's originais foram desenhados para armazenar e transferir informação analógica na forma de pacotes de cargas eléctricas através de uma estrutura semicondutora. As cargas são acumuladas em células de armazenamento compostas por condensadores MOS (Metal, Óxido, Semicondutor), ligados uns aos outros através de circuitos de transferência, permitindo o movimento das cargas de forma ordenada até a um ponto onde possam ser medidas.

Os CCD's podem ter variadas utilizações: memórias, linhas de atraso e detectores ópticos, sendo esta aplicação a de maior interesse para a Astronomia. Num detector fotossensível constituído por registos CCD as cargas eléctricas são produzidas por efeito fotoeléctrico nos fotoelementos, ou células de armazenamento do CCD, organizados em matriz.

Após um período de exposição à luz, designado por tempo de integração, as cargas eléctricas produzidas por efeito fotoeléctrico (fotocargas) são transferidas sequencialmente para um andar de saída onde geram um sinal eléctrico proporcional à energia luminosa incidente em cada fotoelemento, e sincronizado com o ritmo de leitura do CCD.

A injeção de cargas, o seu armazenamento, transferência e leitura constituem as funções básicas do funcionamento de um CCD, que em seguida se descrevem.

2.1. CONDENSADOR MOS

Um condensador MOS é composto por um substrato de material semicondutor dopado, coberto por uma camada isolante, óxido de Silício SiO_2 , muito fina (décimos de μm), sobre a qual é depositado um eléctrodo metálico, designado por "gate", conforme ilustrado na figura 2.1.

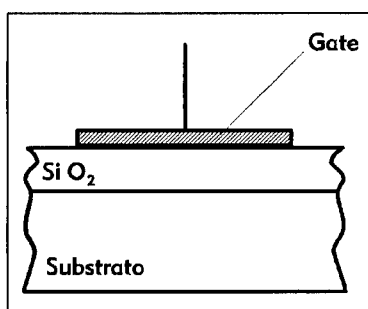


Figura 2.1 – Condensador MOS

A designação MOS deriva da sobreposição das 3 camadas de metal, óxido e semiconductor. Comportando-se o óxido como isolador entre duas camadas condutoras, fica formado um condensador capaz de armazenar cargas.

2.1.1. Portadores de carga:

Um átomo de Silício tem a sua banda de valência ocupada por 4 electrões. Cada electrão de valência pode associar-se a outro de um átomo vizinho através de uma ligação covalente, formando uma rede cristalina em que cada átomo partilha 8 electrões com os átomos vizinhos, completando a banda de valência (figura 2.2).

Se durante o crescimento do cristal de Silício forem introduzidas impurezas, por exemplo átomos de valência 3 - dopagem tipo P, cada átomo da impureza fornece apenas 3 electrões para as ligações covalentes com os átomos vizinhos, pelo que a banda de valência ficará ocupada por 7 electrões, faltando 1 para ser completada. Esta deficiência provoca uma zona do cristal com apetência para captar o electrão em falta, comportando-se como uma carga positiva fictícia que se designa por lacuna ou "hole" (figura 2.3).

Num semiconductor tipo P, o caso usual nos substratos dos CCD's utilizados em Astronomia, as lacunas designam-se por portadores de carga maioritários. Por outro lado devido à quebra de ligações covalentes por efeito térmico, existirão electrões livres, promovidos da banda de valência à banda de condução, constituindo os portadores de carga minoritários.

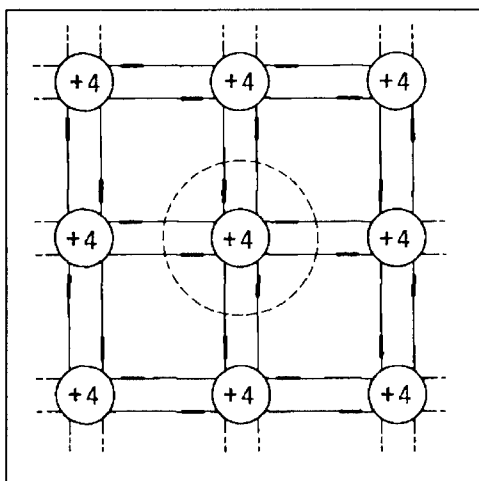


Figura 2.2 - Rede cristalina do Silício

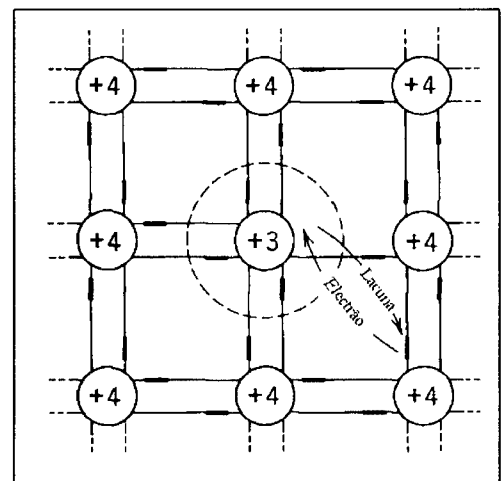


Figura 2.3 - Cristal com dopagem tipo P

2.1.2. Armazenamento de carga:

No instante em que se polariza positivamente o eléctrodo metálico, conforme se mostra na figura 2.4, os portadores de carga maioritários – as lacunas – presentes na vizinhança da transição $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ são empurrados para o interior do substrato, ficando aquela zona deficiente em portadores maioritários, sendo por isso designada por zona de deplecção. A figura 2.4 mostra a variação do potencial V ao longo da superfície de transição óxido – substrato.

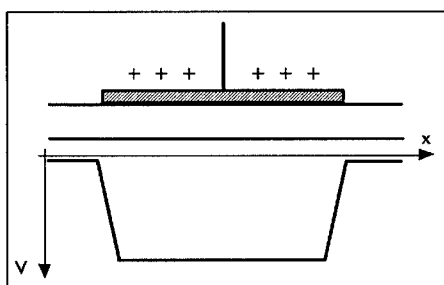


Figura 2.4 – Poço de potencial na zona de deplecção.

Uma zona de deplecção não é um estado de equilíbrio. Constantemente são gerados pares electrão – lacuna dentro da zona de deplecção ou difundidos a partir da sua fronteira. O campo eléctrico aplicado separa os pares electrão – lacuna e os electrões acumulam-se na vizinhança da transição $\text{SiO}_2 - \text{Si}$. Esta concentração de portadores de carga minoritários de tipo oposto ao do substrato designa-se por camada de inversão, provocando a redução da tensão V na superfície de transição de um valor V_1 para V_2 , conforme mostrado na figura 2.5. O fenómeno pode ser visto como um poço de potencial parcialmente preenchido com portadores minoritários, em que a zona sombreada representa as cargas armazenadas – electrões num substrato tipo P. Dependendo da tecnologia usada na cristalização do substrato, o poço de potencial estende-se espacialmente até a uma profundidade de 3 a 6 μm a partir da transição $\text{SiO}_2 - \text{Si}$.

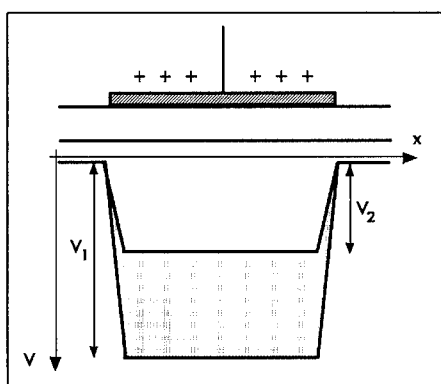


Figura 2.5 – Poço de potencial parcialmente preenchido por portadores minoritários.

2.1.3. "Dark Current":

Devido à produção de pares electrão – lacuna por efeito térmico, após um determinado período de tempo, designado por tempo de relaxação térmica, haverá tantos electrões na superfície de transição como lacunas no substrato, atingindo-se uma situação de equilíbrio em que o poço de potencial fica completamente cheio. O fenómeno designa-se por "dark current" e o tempo de relaxação térmica depende do tipo de Silício, do estado da região de transição $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ e fundamentalmente da temperatura, tomando valores típicos da ordem das dezenas de segundos.

O CCD é utilizado apenas na situação de não – equilíbrio, isto é, enquanto os portadores minoritários produzidos por efeito térmico são desprezáveis face aos gerados por efeito fotoeléctrico. Como é evidente, para um funcionamento útil do CCD, torna-se necessário que as operações de aquisição, transferência e leitura decorram em intervalos de tempo muito pequenos comparados com o tempo de relaxação térmica. Quando tal não é possível, por exemplo em aquisições de longa exposição de objectos astronómicos ténues, torna-se necessário arrefecer drasticamente o semiconductor de modo a aumentar o tempo de relaxação térmica.

2.2. MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA

Sejam duas células de condensadores MOS colocadas lado a lado, com tensões de polarização de "gate" V_1 e V_2 respectivamente. No caso das "gates" estarem suficientemente afastadas, conforme mostrado na figura 2.6, formam-se dois poços de potencial separados por uma barreira.

Contudo para distâncias entre "gates" de cerca de $1 \mu\text{m}$ a barreira de potencial desaparece e as zonas de depleção dos condensadores comunicam entre si, ficando as células acopladas, como evidenciado na figura 2.7.

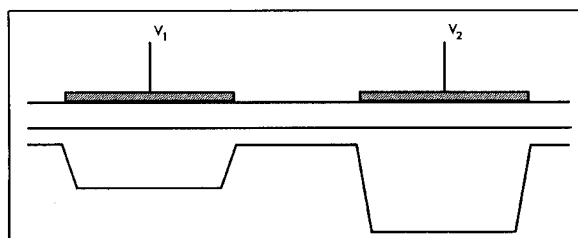


Figura 2.6 – Células não acopladas. Os dois poços de potencial encontram-se separados por uma barreira.

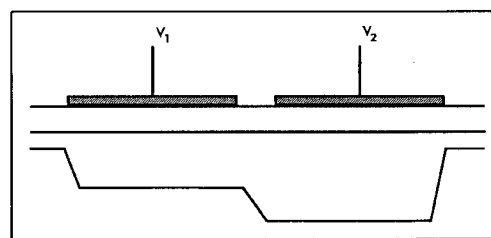


Figura 2.7 – Células acopladas. As zonas de depleção comunicam entre si.

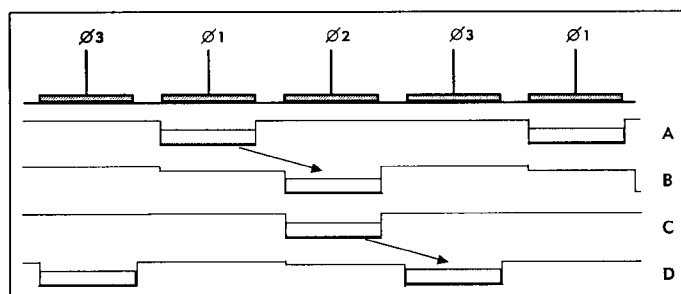
O mecanismo de transferência de cargas baseia-se neste acoplamento, uma vez que aplicando tensões variáveis a células contíguas é possível transferir pacotes de cargas entre células por degraus em virtude das cargas se acumularem nas regiões onde o poço de potencial é mais profundo.

Os sinais de comando aplicados aos eléctrodos são sequenciais e designam-se por "clocks". Vários eléctrodos podem ser sistematicamente ligados entre si de modo a proceder à transferência simultânea de vários pacotes de cargas, designando-se um grupo de eléctrodos com ligação eléctrica comum por fase. Cada fase é comandada por uma sequência de "clock" própria, cuidadosamente ajustada em tempo e atraso relativamente a outras fases, de modo a otimizar, para cada CCD e aplicação pretendida, o mecanismo de transferência de carga.

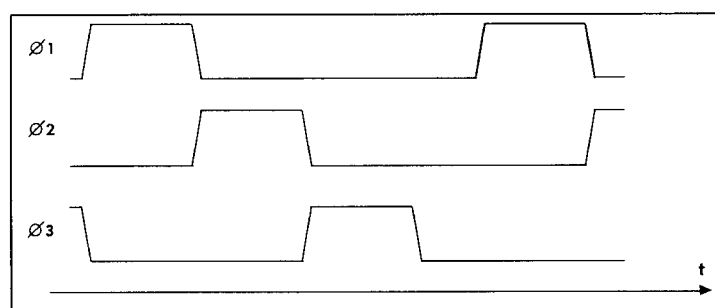
Existem numerosos métodos de transferência, específicos para cada CCD, diferindo em geral no número de fases envolvidas.

2.2.1. Transferência de tripla fase:

A figura 2.8 ilustra o princípio de transferência por tripla fase. Em A) é produzido um poço de potencial sob o eléctrodo 1 por aplicação de uma polarização – sinal de "clock" ϕ_1 no nível alto, pelo que as cargas acumulam-se debaixo desse eléctrodo.



Figuras 2.8 – Transferência de carga por tripla fase.



Figuras 2.9 – Sequência de sinais de clock necessária a uma transferência de carga por tripla fase.

Em B) o eléctrodo 2 é progressivamente polarizado ("clock" ϕ_2 : nível baixo \rightarrow alto) enquanto o eléctrodo 1 é despolarizado ("clock" ϕ_1 : nível alto \rightarrow baixo), pelo que as cargas fluirão de 1 para 2. Idêntica operação é reproduzida entre os eléctrodos 2 e 3 – casos C) e D). A figura 2.9 mostra a sequência de sinais de "clock" ϕ_1 , ϕ_2 e ϕ_3 sendo de notar que os sinais relativos a fases diferentes cruzam-se num nível intermédio de modo a melhorar o fluxo de cargas entre eléctrodos.

2.2.2. Transferência de dupla fase:

No caso do método de transferência por dupla fase a direcção de transferência é indeterminada. Para resolver este problema cada célula capacitiva é formada por um eléctrodo tornado assimétrico através da variação de espessura ou de dopagem, introduzindo um poço de potencial igualmente assimétrico, conforme ilustrado na figura 2.10.

A transferência é garantida mantendo o "clock" de uma fase num nível intermédio e aplicando à outra fase valores de tensão sucessivamente superiores e inferiores ao nível intermédio conforme exemplificado na figura 2.11.

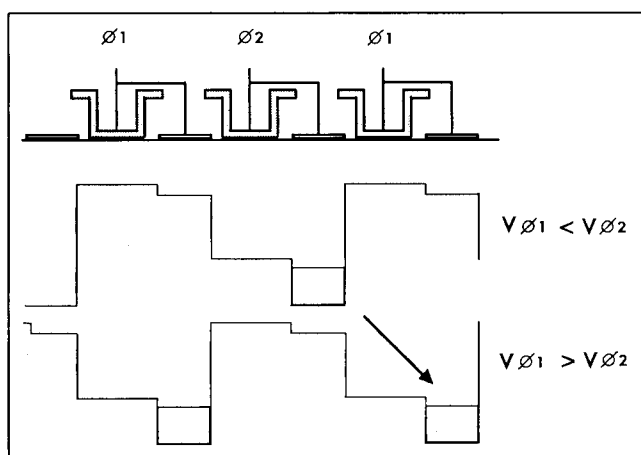


Figura 2.10 - Transferência de carga por dupla fase.

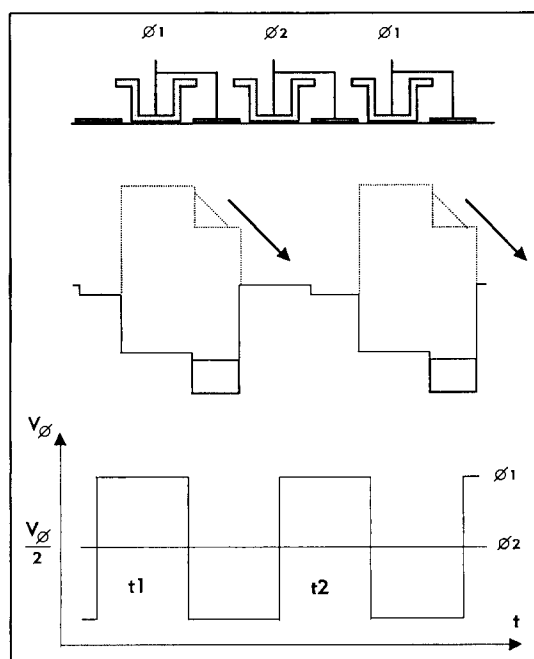


Figura 2.11 - Transferência de carga por dupla fase e respectiva sequência de sinais de clock .

2.2.3. Qualidade de transferência:

Durante a transferência algumas cargas são perdidas durante a comutação de fases, sendo recombinadas no substrato ou recuperadas pelo pacote de cargas seguinte. Tal problema é conhecido por ineficiência de transferência.

A recombinação de cargas pode ser reduzida polarizando negativamente o substrato tipo P. Contudo a principal fonte de ineficiência restante está associada a impurezas existentes na superfície de transição $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ que aprisionam portadores de carga. No sentido de obviar este problema usa-se uma estrutura capaz de afastar os portadores de carga da superfície de transição, introduzindo-se uma zona de semiconductor com dopagem tipo N entre o óxido e o substrato, conforme a figura 2.12.

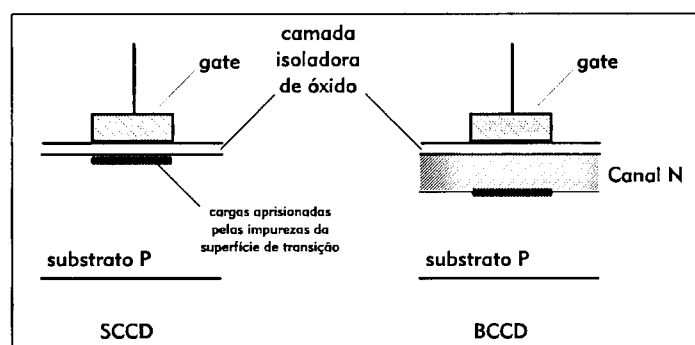


Figura 2.12 – A introdução de um canal de semiconductor tipo N entre o substrato P e a camada de óxido isolador, permite melhorar a qualidade e eficácia da transferência.

Os CCD's construídos deste modo designam-se por BCCD ("Buried Channel CCD") e a configuração normal por SCCD ("Surface Channel CCD"). Com os BCCD's conseguem-se transferências com uma eficiência de 0.999990 e mais rápidas, uma vez que a mobilidade dos portadores de carga é maior num canal semiconductor que numa superfície de transição.

2.3. ANDAR DE SAÍDA

A função do andar de saída é converter as cargas em tensões mensuráveis pelo utilizador num pino de saída do CCD. A figura 2.13 mostra o esquema simplificado de um andar de saída num registo de dupla fase, sendo a configuração conhecida por “floating diode”, em virtude de se basear no pré-carregamento de um diodo que se comporta como um condensador, C_s , polarizado com um valor de tensão de referência. Este condensador será parcialmente descarregado pelas cargas do pacote lido, sendo a diferença de tensão para o nível de referência proporcional à carga total do pacote.

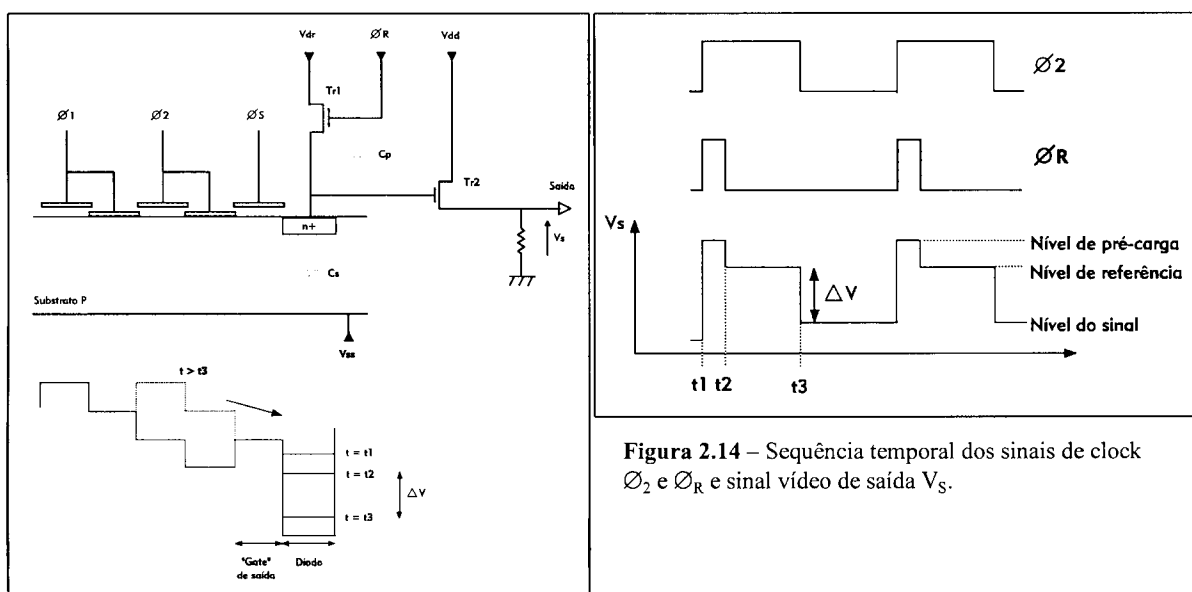


Figura 2.13 – Diagrama de andar de saída com configuração “floating diode”.

Figura 2.14 – Sequência temporal dos sinais de clock ϕ_2 e ϕ_R e sinal vídeo de saída V_s .

De acordo com o diagrama temporal da figura 2.14, no instante t_1 o sinal ϕ_R (sinal de Reset) é comutado para um nível alto, tornando o transistor $Tr1$ condutor, pré-carregando o condensador de saída C_s à tensão V_{dr} (nível de referência). No instante t_2 o sinal ϕ_R volta ao nível baixo, fechando $Tr1$, o que isola o condensador. No instante t_3 o eléctrodo ϕ_2 é comutado para um nível baixo libertando as cargas do pacote para leitura no andar de saída, causando uma queda de tensão aos terminais do condensador C_s . Entretanto o eléctrodo ϕ_5 polarizado num nível de tensão constante, cria uma barreira de potencial entre o pacote de cargas e C_s até ao instante t_3 . A variação de tensão ΔV registada a partir de t_3 e amplificada por $Tr2$ é o sinal pretendido, V_s . Finalmente, novo impulso em ϕ_R volta a carregar o diodo com a tensão de referência permitindo a leitura do pacote de cargas seguinte.

2.4. OS FOTOELEMENTOS

A utilização de CCD's como detectores ópticos baseia-se na injeção de cargas por efeito fotoelétrico. Quando fótons penetram no substrato de Silício transmitem a sua energia aos átomos da rede cristalina, quebrando ligações covalentes e produzindo pares electrão-lacuna. Esses pares são separados pelo campo eléctrico existente no condensador MOS polarizado, migrando os electrões (portadores minoritários) para a superfície de transição $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ e criando uma camada de inversão junto a essa superfície.

O número de electrões produzidos é proporcional ao número de fótons incidentes. A tensão de polarização da "gate" deve ser mantida constante durante a exposição à luz, cuja duração é conhecida como tempo de integração e corresponde ao tempo de exposição em fotografia. O carácter linear da reacção ao estímulo luminoso, bem como o tempo de integração, permitem a detecção de fluxos luminosos muito fracos.

Colocando várias células de condensadores MOS (fotoelementos) lado a lado a imagem óptica obtida será espacialmente discreta, ou seja, amostrada em pontos ou *pixels* (picture elements). A resolução espacial é determinada pelo tamanho dos fotoelementos, que tipicamente têm dimensões entre 10 a 30 μm .

A intensidade do fluxo de fótons no interior do substrato, F , varia com a espessura z do Silício através da expressão:

$$F(z) = F(0) e^{-\alpha z} \quad (2.1)$$

onde α é o coeficiente de absorção intrínseca do Si e $F(0)$ representa o fluxo incidente. Valores típicos de α são em seguida tabelados como função do comprimento de onda λ e da temperatura T :

λ (nm)	$\alpha(\mu\text{m}^{-1})$	
	$T = 300^\circ\text{K}$	$T = 77^\circ\text{K}$
400	5.0	4.0
600	0.5	0.25
800	0.1	0.005
1000	0.01	0.002

Tabela 2.1 – Coeficiente, α , de absorção intrínseca do Silício à radiação de comprimento de onda, λ .

Facilmente se verifica que 90% da radiação incidente é absorvida após um percurso de $2\alpha^{-1}$, pelo que os fotões azuis (400nm) são absorvidos em $1\ \mu\text{m}$, enquanto os vermelhos (1000nm) podem penetrar até $100\ \mu\text{m}$. Por outro lado fotões com comprimentos de onda superiores a $1100\ \text{nm}$ não possuem energia suficiente para produzir um par electrão-lacuna. Deste modo a curva de sensibilidade espectral é determinada por:

- A sensibilidade ao azul é limitada pela fraca penetração da radiação não atingindo zonas de produção de carga. O aumento de sensibilidade às radiações desta zona do espectro obtém-se diminuindo a espessura de Si.
- No vermelho as propriedades físicas do Si não permitem a detecção de radiação com comprimentos de onda superiores a $1.1\ \mu\text{m}$. Abaixo deste valor a sensibilidade pode ser aumentada utilizando camadas de Si mais espessas.

A tentativa de aumento de sensibilidade nos extremos do espectro conduz a uma contradição, pelo que existem CCD's com dois tipos de disposição dos fotoelementos: Iluminação frontal e de retaguarda.

2.4.1. Iluminação frontal (Frontside CCD's):

Conforme se mostra na figura 2.15 a radiação luminosa tem de atravessar o eléctrodo metálico e o óxido antes de atingir o substrato de Silício, pelo que a eficiência desta configuração não excede 50% no pico de sensibilidade espectral. As diversas camadas atravessadas pela radiação tornam-se menos transparentes à medida que diminui o comprimento de onda, pelo que os fotoelementos serão virtualmente insensíveis à extremidade azul do espectro. Por outro lado a sensibilidade ao vermelho é satisfatória, aumentando com a espessura do substrato.

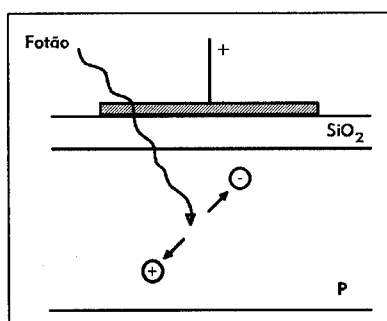


Figura 2.15 – Injecção de carga por efeito fotoeléctrico num CCD de iluminação frontal.

Contudo existe uma técnica capaz de melhorar a sensibilidade ao azul desta configuração, que consiste em cobrir a face exposta à luz com uma fina camada de material fluorescente. Quando um fóton atinge esta camada produz-se fluorescência no ponto de impacto e se o fóton reemitido tiver comprimento de onda detectável pelo CCD, torna-se então possível detectar indirectamente um fóton azul ou mesmo ultravioleta, conforme ilustrado pela figura 2.16.

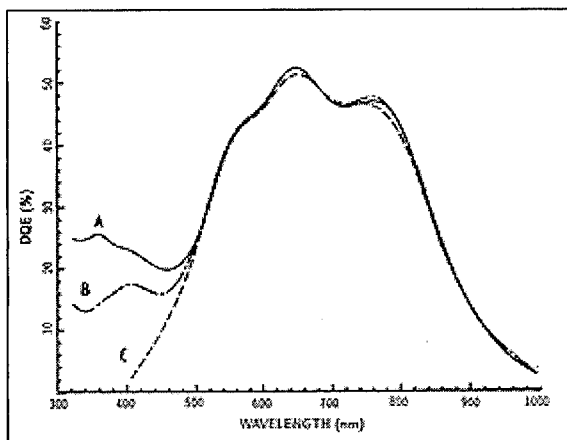


Figura 2.16 – Eficiência quântica de detecção em função do comprimento de onda para um CCD cuja superfície foi recentemente tratada com camada fluorescente (A). Após 6 meses a eficiência diminui (B). Resposta do mesmo CCD com superfície não sujeita a tratamento (C). [Ref. 1].

2.4.2. Iluminação de retaguarda (Backside CCD's):

Nesta configuração, representada na figura 2.17, a luz incide directamente no substrato de Si, pelo que a eficiência deveria ser máxima, uma vez que não existem camadas intermédias a atravessar pela radiação. Contudo para que o armazenamento de cargas sob o eléctrodo seja efectivo, estas deverão ser produzidas na zona de depleção. Esta zona, na vizinhança da transição $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ é muito fina e o resto do substrato semiconductor comporta-se como opaco, pelo que a solução consiste em utilizar substratos de reduzida espessura. Melhora-se bastante a sensibilidade na zona azul do espectro em detrimento de uma perda acentuada na região vermelha em virtude do excessivo poder de penetração destes comprimentos de onda.

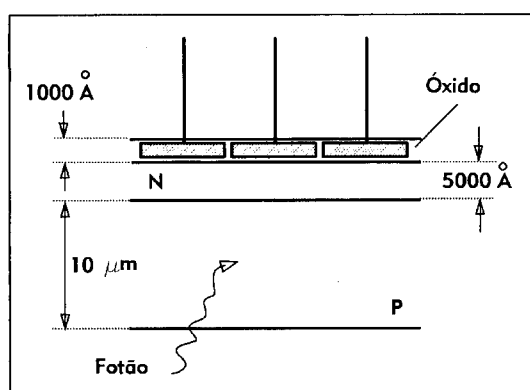


Figura 2.17 – Dimensões de um CCD de iluminação de retaguarda. O substrato é reduzido a uma fina camada de 10 µm de espessura. Note-se que as gates se encontram embudadas na camada de óxido.

2.5. ORGANIZAÇÃO DE UM CCD

Embora existam CCD's lineares, constituídos por uma linha de fotoelementos, utilizados em "faxes" e "scanners", em Astronomia apenas se usam CCD's em que os fotoelementos cobrem determinada área de exposição, estando organizados matricialmente em linhas e colunas. Distinguem-se dois tipos de organização que diferem na técnica de transferência utilizada: "interline transfer array" e "frame transfer array".

2.5.1. "Interline transfer array":

Este tipo de organização encontra-se esquematizado na figura 2.18. Cada coluna de fotoelementos está associada a um registo de transferência adjacente. Em virtude destes registos terem propriedades de fotossensibilidade idênticas aos fotoelementos, encontram-se cobertos por uma máscara de alumínio opaco de modo a serem opticamente dessensibilizados. Deste modo, a informação transportada nos registos verticais não é perturbada pelo fluxo luminoso incidente.

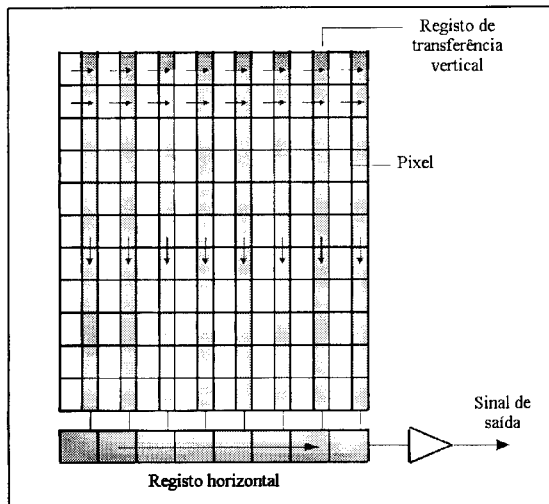


Figura 2.18 – Interline transfer array

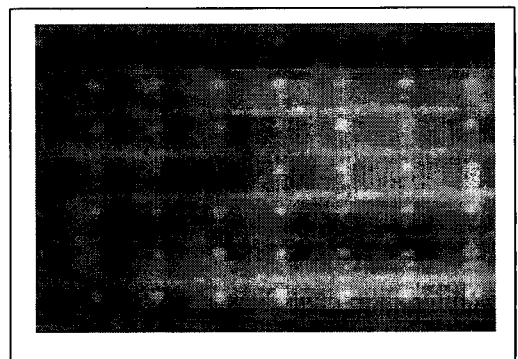


Figura 2.19 – Fotografia microscópica de um CCD com "interline transfer". Apenas as zonas escuras são fotossensíveis. As linhas verticais são reservadas para transferência. As horizontais ao transporte de sinais eléctricos. [Ref. 3].

No final do tempo de integração, as cargas geradas nos fotoelementos são simultânea e rapidamente ($\approx 1\mu\text{s}$) transferidas para os registos verticais adjacentes e enquanto os fotoelementos integram nova imagem, os pacotes de cargas presentes nos registos verticais são transferidos linha a linha para o registo horizontal que é lido de modo à informação chegar sequencialmente ao andar de saída.

A presença dos registos de transferência entre colunas de fotoelementos traduz-se numa perda de superfície sensível (cerca de 50%), mas obtém-se uma maior eficácia no processo de transferência, garantindo-se que os pacotes de cargas não sejam corrompidos por fluxo incidente durante a transferência. Pelo exposto, este tipo de organização funciona como um obturador electrónico, permitindo a utilização da câmara sem necessidade de obturador mecânico para interromper a exposição. Contudo, em virtude de apenas parte da área de cada fotoelemento ser sensível à luz, este tipo de configuração não será apropriado para aplicações fotométricas.

2.5.2. "Frame transfer array"

Nesta configuração o "chip" encontra-se dividido em duas matrizes distintas: uma é sensível à luz e constitui a zona de imagem; A outra, idêntica mas coberta por uma máscara opaca, forma a zona de memória (figuras 2.20 e 2.21).

Após o tempo de integração na zona de imagem, as cargas são transferidas tão rapidamente quanto possível para a zona de memória protegida da radiação incidente. Para tal, os próprios fotoelementos estão organizados em registos de transferência vertical, e os "clocks" que governam a transferência nas duas zonas são idênticos ($\phi_P = \phi_M$). Para cada impulso dos "clocks" os conteúdos de uma linha são simultaneamente transferidos para a linha seguinte, até toda a zona de imagem ter sido transferida para a zona de memória. Finalmente toda a informação contida na zona de memória é transferida linha a linha para o registo horizontal de modo a ser lida sequencialmente.

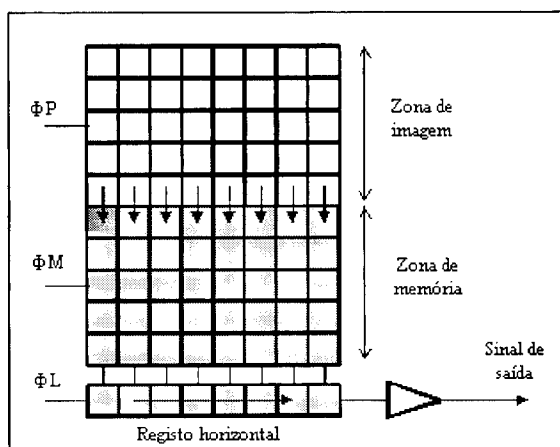


Figura 2.20 – Organização em "Frame transfer array"

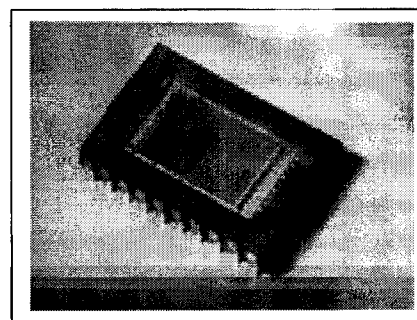


Figura 2.21 – Imagem de um chip CCD organizado em "Frame transfer array". Distinguem-se perfeitamente as zonas de imagem e de memória, esta mais clara devido à máscara metálica que a cobre.

O tempo de transferência da zona de imagem para a zona de memória deverá ser muito pequeno comparado com o tempo de exposição, a fim de evitar corromper os pacotes de cargas durante a transferência por fotocargas entretanto geradas. Usualmente é esse o caso em Astronomia, isto é, tempos de exposição longos comparativamente ao tempo de transferência (tipicamente < 1 ms, para os dispositivos comerciais comuns utilizados em aplicações amadoras ou de divulgação).

Embora o tempo necessário para completar o processo de leitura (zona de memória – registo horizontal – andar de saída) possa atingir dezenas de segundos, dependendo da dimensão da matriz, alguns fabricantes de CCD's transformam a zona de memória em zona de imagem, duplicando a superfície sensível ("full frame array"). Contudo nestes casos, e em algumas aplicações, é imprescindível a utilização de um obturador mecânico de modo a evitar que um objecto particularmente brilhante perturbe o processo de leitura.

2.6. OUTROS ASPECTOS TECNOLÓGICOS

A aplicação generalizada de detectores CCD em aplicações astronómicas de aquisição de imagem e fotometria obrigou os fabricantes a desenvolverem tecnologias e a incorporar dispositivos específicos para esta aplicação. Nesta sessão irão ser abordados conceitos, requisitos e limitações específicas da aplicação dos detectores CCD em Astronomia e as tecnologias desenvolvidas pelos fabricantes com o intuito de adaptar os seus produtos a estas solicitações.

2.6.1. Capacidade de um Fotoelemento – “Well Depth”:

Como discutido anteriormente a energia luminosa incidente em cada fotoelemento gera por efeito fotoeléctrico pares electrão – lacuna no semiconductor. Estando a “gate” polarizada forma-se um poço de potencial na zona de depleção que pode acumular portadores de carga minoritários – electrões. A capacidade de acumulação não é, contudo, ilimitada e depende de cada detector CCD, sendo referida na literatura técnica dos fabricantes como “well depth” e expressa em electrões(e^-). Regra geral aumenta com as dimensões dos fotoelementos, dependendo também da tecnologia de construção utilizada. Como referência, os valores apontados pelos fabricantes, variam desde 45 000 e^- (Kodak KAF-1400, fotoelementos de $6,8 \times 6,8 \mu\text{m}$, tecnologia MPP) a 940 000 e^- (Thomson 7863, fotoelementos de $23 \times 23 \mu\text{m}$, tecnologia tradicional).

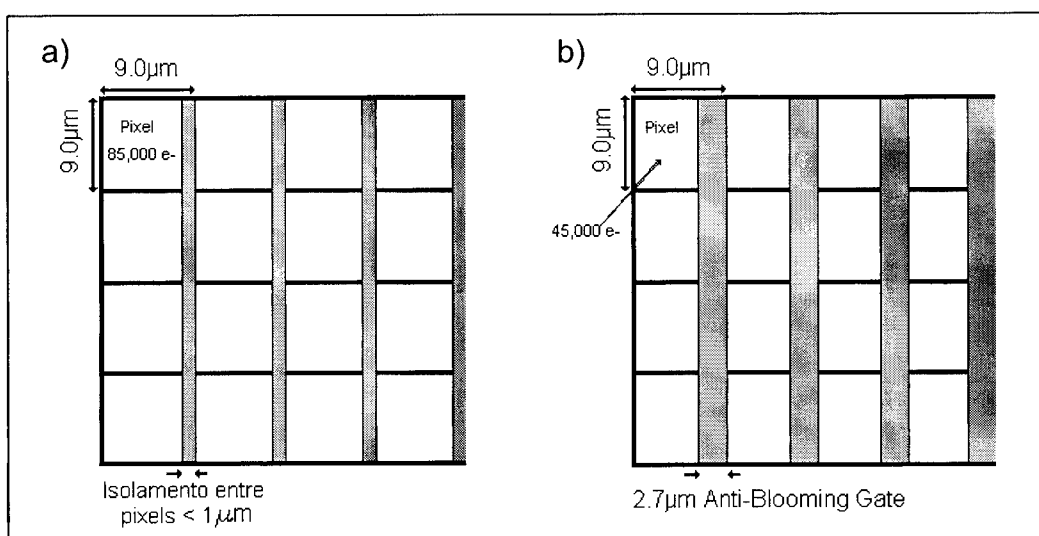


Figura 2.23 – Detector CCD normal (a) e com “gates anti – blooming” (b). Note-se a diminuição de superfície sensível, bem como a capacidade do poço de potencial de cada pixel.

2.6.2. Saturação – “Anti – Blooming Gates”:

Quando a quantidade de radiação luminosa que atinge determinado fotoelemento durante o tempo de integração for suficientemente elevada, o número de electrões gerados pode exceder a capacidade do poço de potencial. Diz-se, então, que o fotoelemento se encontra saturado e o excesso de carga tem normalmente tendência a espalhar-se pelos fotoelementos adjacentes, provocando um halo em volta dos pontos mais intensos da imagem adquirida (por exemplo, uma estrela brilhante). Cumulativamente, o número de cargas acumuladas num poço de potencial saturado pode ser tal que o seu conteúdo não seja esvaziado apenas numa única transferência, aparecendo um rasto na imagem produzida, que partindo do fotoelemento saturado se propaga na direcção de transferência das linhas da matriz, conforme se ilustra na figura 2.22. Este efeito denomina-se “blooming”.

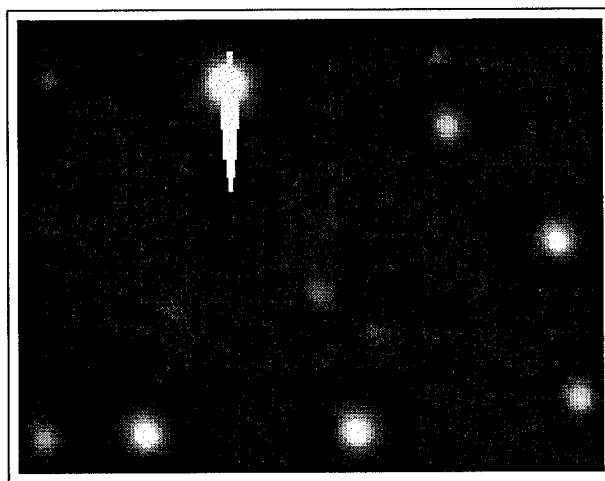


Figura 2.22 – “Blooming”. A saturação de um fotoelemento tende a produzir um rasto na imagem durante a transferência de cargas.

No sentido de limitar este efeito inconveniente, os fabricantes de detectores CCD implementam nos seus chips “anti – blooming gates”, que consistem em eléctrodos colocados nas margens dos fotoelementos destinados a drenarem o excesso de carga. Contudo, estas “gates” ocupam cerca de 30% da área do fotoelemento, conforme esquematizado na figura 2.23, resultando numa diminuição da capacidade do poço de potencial e de sensibilidade. Além disso, a área do detector ocupada pelas “anti – blooming gates” cria um espaçamento acentuado entre os fotoelementos, reduzindo a resolução efectiva do detector.

2.6.3. "Binning":

É usual confundir-se fotoelemento com pixel. Contudo estes termos representam entidades distintas: o fotoelemento é um elemento físico sensor de radiação do detector; o pixel é um ponto que compõe uma imagem no écran de um computador. Quando a imagem final é formada de modo a que cada pixel traduza a intensidade de radiação incidente num fotoelemento, então ambos os conceitos são equivalentes, embora nem sempre assim seja.

A maior parte dos detectores CCD fabricados actualmente possuem a capacidade de transferir cargas de vários fotoelementos em ambas as direcções, horizontal e vertical, para um pacote de cargas comum ou "superpixel". Esta nova entidade representa a área de todos os pixels individuais que contribuíram para a totalidade da sua carga. Esta técnica é conhecida por "Binning" e encontra-se ilustrada na figura 2.24.

O caso de um "binning" 1x1 representa a situação habitual, em que cada fotoelemento é traduzido por um pixel. No caso de "binning" 2x2 as áreas de quatro fotoelementos adjacentes são combinadas num único pixel grande, aumentando a sensibilidade à radiação quatro vezes à custa de uma redução para metade da resolução da imagem.

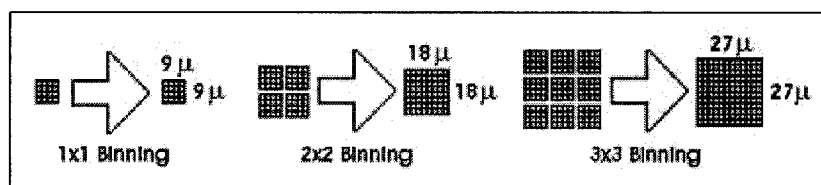


Figura 2.24 – Exemplificação de técnicas de "Binning". Permitem o aumento de sensibilidade do detector à custa da perda de resolução.

Conforme será discutido posteriormente (secção 3.1), esta técnica permite corrigir a geometria dos fotoelementos rectangulares em quadrados e adaptar convenientemente a dimensão dos pixels à distância focal da óptica utilizada, optimizando a resolução e sensibilidade para cada objecto-alvo cuja imagem se pretenda adquirir. Permite, ainda, quando realizado internamente, leituras mais rápidas da matriz, o que poderá ser útil em modos de guiamento ou focagem, tirando também partido da maior sensibilidade e consequente menor tempo de integração necessário.

2.6.4. Pixels defeituosos:

Pixels defeituosos são fotoelementos cujo ganho difere apreciavelmente em relação à média da matriz. É comum aparecerem num detector fotoelementos que saturam rapidamente (“hot spots”) e outros insensíveis à luz (“dark spots”), ou mesmo colunas inteiras deficientes.

É extremamente difícil produzir detectores livres de falhas, especialmente os de grandes dimensões, sendo aquelas ocasionadas por curtos-circuitos entre “gates” ou contactos interrompidos nas ligações de fases de clock. Outro problema que ocasionalmente ocorre consiste na prisão de cargas ao nível de um pixel, afectando parte do conteúdo de uma coluna e traduzindo-se por um rasto com origem no pixel defeituoso, que se pode estender pelo restante da respectiva coluna, em consequência do processo de transferência de cargas.

Os avanços tecnológicos ocorridos nas duas últimas décadas têm conseguido aumentar a perfeição na produção dos detectores, permitindo aumentar a sua dimensão:

- A substituição do alumínio das “gates” por silício polimerizado (“poly-silicon”) provoca a diminuição da ocorrência de curtos-circuitos entre eléctrodos, e sendo este produto transparente aos fotões incidentes, permite a construção de detectores de iluminação frontal com melhor eficiência quântica;
- O processamento avançado do Silício (“Advanced Silicon Processing”) permite a redução das correntes de fuga ao nível do substrato (“substrate shorts”), limitando a perda de cargas dos pacotes no processo de transferência;
- Com melhor nível asséptico nas zonas de produção consegue-se diminuir a contaminação dos produtos por impurezas geralmente responsáveis pelo aprisionamento de cargas ao nível dos pixels;
- Técnicas de fotolitografia permitem a implantação precisa de regiões dopadas e interconexões, conseguindo-se pixels de apenas 5 μm em matrizes de transferência por tripla fase.

Deste modo, enquanto os primeiros detectores CCD, produzidos na década de 70 com os recursos tecnológicos tradicionais existentes na época, estavam limitados à dimensão de 512x512, foi possível expandir essa dimensão até a 800x800 (detectores utilizados no HST), no final da década de 80, sendo hoje usual

dispositivos que atingem a dimensão de 2048x2048, estando a serem planeados mosaicos ainda maiores.

2.6.5. Tecnologia MPP:

Uma das maiores limitações dos detectores CCD em aplicações astronómicas deve-se à inevitabilidade do ruído de origem térmica (“dark current”), dificultando a operação dos detectores em longas exposições e obrigando ao arrefecimento dos dispositivos com o recurso a técnicas criogénicas onerosas.

Contudo, tem sido desenvolvida pelos fabricantes a tecnologia MPP (“Multi-pinned Phase”) que consiste na polarização negativa do canal N adjacente à superfície de transição $\text{SiO}_2\text{-Si}$ nos “Burried Channel CCD’s”, em relação ao substrato – inversão de fase, conseguindo-se a presença de portadores de carga livres nas proximidades da superfície de transição, que irão reduzir a taxa de geração de pares electrão – lacuna por efeito térmico. De modo a existir poço de potencial com inversão de fase é requerido que o potencial de uma das fases seja deslocado (“offset”) em relação às restantes. Tal é conseguido pela implantação de dopagem de Boro sob os eléctrodos de uma das fases.

Embora a capacidade do poço de potencial (“well depth”) seja reduzido por um factor de 2 a 5, atingem-se reduções no valor da “dark current” por factores de 30 a 50!, dependendo da quantidade da dopagem de Boro.

- CAPÍTULO 3 -

CARACTERÍSTICAS GENÉRICAS DE
UM DETECTOR CCD

3. CARACTERÍSTICAS GENÉRICAS DE UM DETECTOR CCD

3.1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Os fotoelementos ou pixels são superfícies retangulares com dimensões de alguns μm , conforme se apresenta no quadro seguinte, para alguns detectores CCD comuns:

Detector CCD	Dimensões dos pixels (μm)	Número de pixels	Superfície sensível (mm)
Kodak KAF-0400	9.0 x 9.0	765 x 510	6.8 x 4.6
Texas Inst. TC 211	13.75 x 16	192 x 165	2.64 x 2.64
Texas Inst. TC 241	11.5 x 27	754 x 244	8.7 x 6.6
Texas Inst. TC 245 a)	17 x 19.75	378 x 242	6.4 x 4.8
Texas Inst. TC 245 b)	25.5 x 19.75	252 x 242	6.4 x 4.8
Texas Inst. TC 255	10 x 10	320 x 240	3.2 x 2.4
Sony ICX 083 AL	23.2 x 22.4	376 x 290	8.7 x 6.5

Tabela 3.1 – Características geométricas de alguns detectores CCD comuns.

Notas: a) com "binning" 2 x 1; b) com "binning" 3 x 1

3.1.1. Forma dos pixels:

Como se pode verificar os pixels são aproximadamente quadrados, em virtude das imagens produzidas se destinarem a serem exibidas num écran de computador, fazendo corresponder cada pixel a um ponto do écran. Como estes são normalmente equidistantes, pixels não quadrados produziriam imagens distorcidas num dos eixos.

Contudo, para os detectores Texas Instruments TC 241, em que os pixels têm dimensões retangulares, a câmara adiciona automaticamente 2 pixels consecutivos ("binning") pelo que a imagem será formada com metade do número de pixels de dimensões 27 x 23 μm . O detector Texas Instruments TC 245, cuja dimensão real dos pixels é de 8.5 x 19.75 μm , funciona sempre com "binning" de 2 x 1 ou 3 x 1, controlado por software.

3.1.2. Dimensões dos pixels – Resolução da imagem:

A resolução máxima das imagens obtidas num sistema telescópio – CCD é determinada pela abertura do telescópio, pela turbulência atmosférica do local de observação (“seeing”) e pela amostragem da imagem (“sampling”) que é função da relação da distância focal do sistema óptico com as dimensões dos pixels do CCD.

A primeira limitação decorre do fenómeno da difracção causado pela abertura do telescópio, sendo o limite teórico estabelecido pelo critério de Rayleigh através da expressão:

$$\alpha(rad) = \frac{1,22 \cdot \lambda}{D} \Rightarrow \alpha(") = 206265 \cdot \frac{1,22 \cdot \lambda}{D}, \quad (3.1)$$

onde α representa o poder resolvente, ou seja, a menor separação entre dois objectos pontuais que o dispositivo consegue resolver, D a sua abertura e λ o comprimento de onda da radiação. Concretizando para um telescópio de 8 polegadas de abertura, usual em aplicações astronómicas amadoras e de divulgação, será $D = 200$ mm e $\lambda \approx 550$ nm, vindo $\alpha = 0.69''$.

Contudo este limite teórico revela-se de pouco interesse prático uma vez que, devido à turbulência atmosférica, a imagem de um objecto pontual, como uma estrela, formada no foco do telescópio apresenta-se não pontual, mas antes uma mancha de dimensões apreciáveis dependendo da qualidade do local de observação. Este fenómeno é geralmente conhecido por “seeing” e em locais de observação acessíveis de média qualidade produz imagens de estrelas com a dimensão de 2 a 3 segundos-de-arco.

A terceira fonte de limitação da resolução tem origem na amostragem espacial da imagem pelo detector CCD, uma vez que a imagem é detectada por elementos, ou pixels, com dimensões físicas não pontuais. De acordo com a figura 3.1, é possível relacionar a dimensão linear da imagem formada no plano focal com a dimensão angular θ do objecto observado, através da expressão:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{d}{F_c} \Rightarrow d \approx F_c \cdot \theta(rad), \text{ para valores de } \theta \ll 1 \text{ rad}, \quad (3.2)$$

ou,

$$d \approx \frac{F_c \cdot \theta(")}{206265} \Rightarrow \theta(") \approx 206265 \cdot \frac{d}{F_c}, \quad (3.3)$$

onde F_c representa a distância focal do telescópio, d a dimensão linear da imagem e θ a dimensão angular do objecto em segundos-de-arco.

Concretizando como anteriormente para um telescópio de 8 polegadas, razão focal $F_c/D=10$ (usualmente representada por $f/10$), será $F_c=2000$ mm, e considerando d como a dimensão dos pixels, θ representará a resolução espacial de cada pixel ou “sampling”. Na tabela 3.2 resumem-se os valores determinados, com base nas considerações anteriores, para alguns detectores CCD comuns.

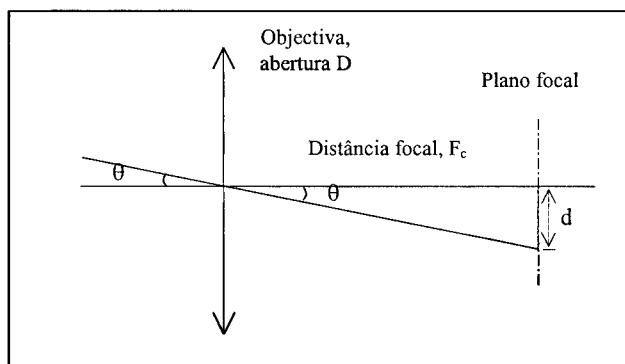


Figura 3.1 – Dimensão linear da imagem formada no plano focal de um telescópio, em função da dimensão angular do objecto observado.

Detector CCD	Dimensões médias dos pixels (μm)	Resolução espacial (segundos de arco / pixel)
Kodak KAF-0400	9	0.93"
Texas Inst. TC 211	15	1.54"
Texas Inst. TC 241 (2x1 binning)	25	2.58"
Texas Inst. TC 245 (2x1 binning)	18	1.86"
Texas Inst. TC 245 (3x1 binning)	23	2.37"
Texas Inst. TC 255	10	1.03"
Sony ICX 083 AL	23	2.37"

Tabela 3.2 – Valores determinados para a resolução espacial de alguns detectores CCD comuns, supostos montados no foco principal dum telescópio de 8 polegadas, $f/10$.

De acordo com o teorema de amostragem de Nyquist⁽¹⁾ serão necessários dois pixels para adquirir correctamente a imagem de uma estrela. Usar maior número de pixels não aumentaria a quantidade de informação adquirida, apenas

(1) H. Nyquist estabeleceu em 1928 o Teorema de Amostragem aplicado à digitalização de um sinal analógico de largura de banda limitada B , segundo o qual, serão suficientes $2B$ amostras por segundo para o representar univocamente. Tornou-se um resultado fundamental da Teoria da Informação, sendo generalizado para qualquer medida de quantidade de informação de um sinal, relacionando o número de quantidades independentes necessárias para descrever completamente o sinal. No presente contexto está aplicado à quantidade de informação existente no sinal espacial duma imagem pontual formada por entidades independentes – os pixels.

tornaria a imagem esbatida por a mesma quantidade de luz se espalhar por mais pixels, o que diminuiria a iluminação do detector e a relação sinal - ruído, reduzindo a qualidade da informação adquirida. Este facto designa-se por sobreamostragem ou “oversampling”, e segundo o valor anteriormente apontado para o “seeing” médio que ocorre nos locais habituais de observação, impõe um limite inferior à dimensão do pixel do detector a utilizar para determinada configuração óptica, não devendo proporcionar uma resolução espacial inferior a $1 \sim 1,5$ segundos-de-arco por pixel.

De modo oposto, existirá um limite superior para as dimensões dos pixels, uma vez que pixels demasiado grandes provocariam para a mesma configuração óptica o fenómeno contrário, conhecido por subamostragem ou “undersample”, que se traduz por imagens de estrelas com forma quadrada, conforme ilustrado na figura 3.2, embora neste caso se esteja a maximizar a sensibilidade e a relação sinal – ruído do detector.

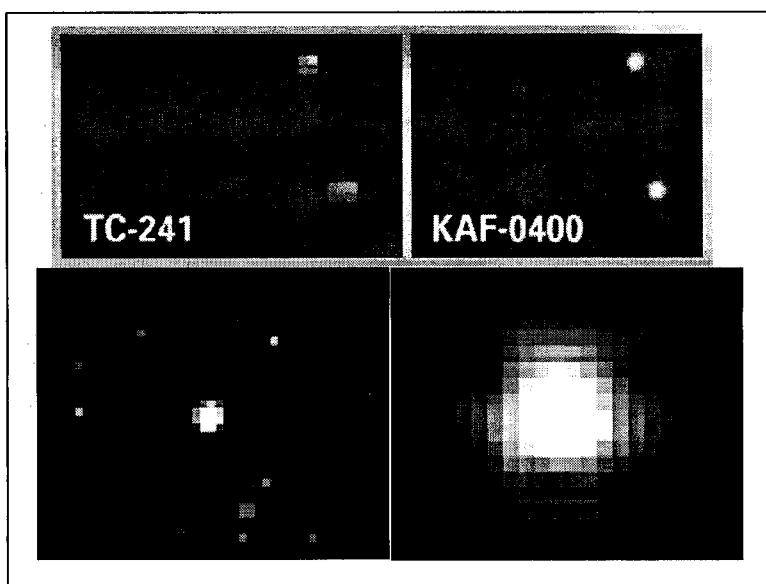


Figura 3.2 –“Undersampling” e “Oversampling”. Comparação de imagens de estrelas obtidas com configuração óptica e condições de “seeing” idênticas, por detectores com pixels de $25 \mu\text{m}$ no primeiro caso (à esquerda – TC-241) e com pixels de $9 \mu\text{m}$ no segundo caso (à direita – KAF-0400).

3.1.3. Superfície sensível total do detector – Campo de visão:

Outro aspecto importante que interessa conhecer para a realização de aquisição de imagem astronómica num sistema telescópio – detector CCD é a quantidade de área de céu que uma imagem adquirida pode cobrir, ou seja, o campo de visão do sistema. Este aspecto será função da configuração óptica utilizada e da superfície sensível do detector.

De acordo com a figura 3.1 e através da expressão 3.3 pode-se calcular o campo de visão para um determinado sistema telescópio - detector CCD, considerando agora d como a dimensão linear da superfície total sensível do detector, será θ o ângulo coberto pela imagem. Na tabela 3.3 encontram-se resumidos os valores determinados para alguns detectores CCD comuns, supostamente montados no foco principal dum telescópio de 8 polegadas, $f/10$.

Detector CCD	Superfície sensível (mm)	Campo de visão (minutos de arco)
Kodak KAF-0400	6.8 x 4.6	11.7' x 7.9'
Texas Inst. TC 211	2.64 x 2.64	4.5' x 4.5'
Texas Inst. TC 241	8.7 x 6.6	15' x 11.3'
Texas Inst. TC 245	6.4 x 4.8	11.0' x 8.3'
Texas Inst. TC 255	3.2 x 2.4	5.5' x 4.1'
Sony ICX 083 AL	8.7 x 6.5	15.0' x 11.2'

Tabela 3.3 – Valores determinados para o campo de visão de alguns detectores CCD mais comuns, supostos montados no foco principal dum telescópio de 8 polegadas, $f/10$.

No sentido de ilustrar o presente objecto de discussão, a figura 3.3 compara três imagens da galáxia M51 obtidas com um telescópio refractor de 7 polegadas, $f/7$. As imagens são reproduzidas na mesma escala para mostrar os campos de visão relativos dos três detectores utilizados (TC-255, KAF-0400, TC-241).

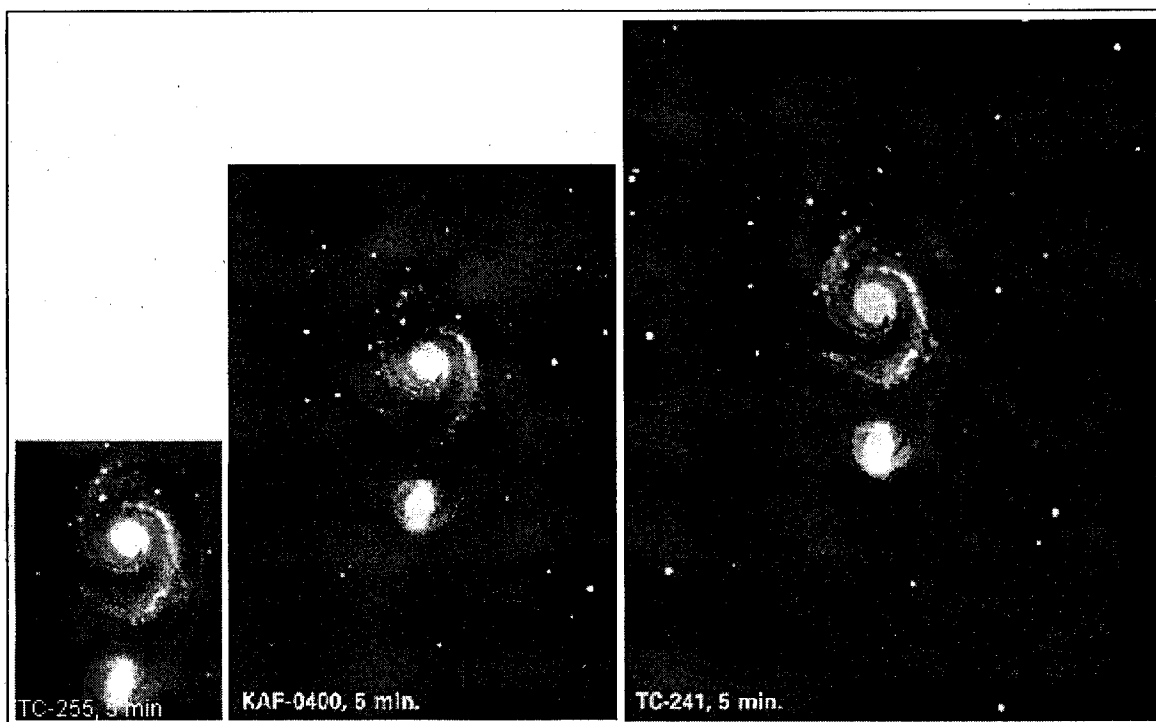


Figura 3.3 – Comparação do campo de visão de três detectores CCD. Imagens da galáxia M51 obtidas com um telescópio refractor 7 polegadas, $f/7$ e exposições de 5 minutos com os detectores TC-255, KAF-0400, TC-241. [Ref. 14]

3.1.4. Escolha da combinação óptica ótima:

Nos aspectos discutidos nas secções anteriores realçou-se a importância da adaptação entre a dimensão do pixel do detector CCD e a distância focal do sistema óptico utilizado, com o objectivo de conseguir um ajuste apropriado entre as situações de sobreamostragem e subamostragem na imagem adquirida: a melhor resolução obtida com pixels de dimensão menor tende a tornar a imagem sobreamostrada com a consequente diminuição de sensibilidade; o aumento de sensibilidade conseguido com pixels de maior dimensão faz-se com o risco de subamostrar a imagem com a consequente perda de resolução.

Porém, para a escolha da combinação óptica ótima entre sistema óptico e detector CCD, os aspectos focados não são suficientes. É necessário considerar também o objecto – alvo cuja imagem se pretende adquirir, bem como as condições de “seeing” existentes no local de observação. Cada objecto astronómico alvo caracteriza-se pelo seu brilho e extensão espacial, pelo que também deverá ser tomado em atenção o campo de visão que o detector CCD consegue atingir com o sistema óptico utilizado. Como é sabido, este parâmetro depende das dimensões da superfície sensível do detector que, por sua vez, estão relacionadas com as

dimensões de cada pixel e do número de linhas e colunas da matriz. Deste modo, a resolução espacial e o campo de visão das imagens adquiridas por um sistema telescópio - detector CCD, não serão parâmetros totalmente independentes, importando conhecer as suas inter-relações e implicações nas imagens obtidas de modo a otimizar o sistema para a aquisição de cada objecto astronómico.

Na tentativa de melhor expor a problemática subjacente a esta discussão convém particularizar para os dois grandes grupos de objectos astronómicos alvo: galáxias ou nebulosas (“deep sky”) e planetas.

As galáxias e nebulosas, objectos de céu profundo, caracterizam-se por serem objectos geralmente ténues e extensos, pelo que na aquisição das suas imagens importa maximizar a sensibilidade do detector em detrimento da resolução, recorrendo a maior resolução espacial por pixel, seja usando pixels de maiores dimensões, ou, segundo a expressão (3.3), distâncias focais menores, o que também aumentará o campo de visão.

Os planetas (do Sistema Solar), por sua vez, caracterizam-se por serem objectos muito brilhantes, geralmente pouco extensos (excluindo a Lua) e ricos em pormenores, pelo que importa maximizar a resolução em detrimento da sensibilidade e campo de visão, sendo vantajoso recorrer a menor resolução espacial por pixel, usando pixels de menor dimensão, ou distâncias focais maiores.

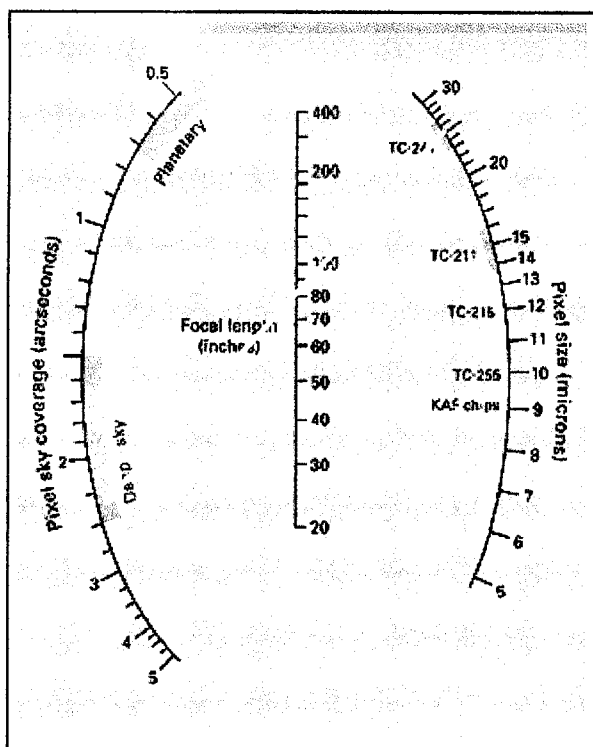


Figura 3.4 – Ábaco que relaciona distância focal, dimensão de pixel e resolução por pixel, permitindo a escolha de valores convenientes para a aquisição de imagem de planetas ou de céu profundo. [Ref. 13]

Na figura 3.4 apresenta-se um ábaco que relaciona as três variáveis pertinentes da expressão (3.3), distância focal, dimensão de pixel e resolução por pixel, permitindo determinar graficamente a sua inter-relação e escolher valores convenientes para a aquisição dos diferentes tipos de objectos – alvo. Como exemplo apresenta-se desenhada a recta correspondente a um detector TC241, pixels de 25 μm , montado num telescópio com distância focal de 80 polegadas (≈ 2000 mm), permitindo determinar graficamente uma resolução espacial de $\approx 2,5''$, adequada à aquisição de imagens de céu profundo.

A discussão anterior, importante do ponto de vista teórico, tem aplicabilidade prática limitada em virtude de, usualmente, em termos de observações de carácter amador ou de divulgação, se estar restringido à utilização do equipamento existente, ou seja, um telescópio e câmara CCD específicos. A optimização do sistema terá então de ser atingida com o recurso a técnicas de “binning”, se o detector o permitir, e à intercalação no sistema óptico de uma lente “Barlow”⁽¹⁾ ou de sistemas redutores de focal. Assim, para um determinado telescópio, na aquisição de imagens planetárias poder-se-á recorrer à utilização de lentes “Barlow”, que multiplicando a distância focal por um factor de dois geralmente, poderá produzir resoluções por pixel de valores inferiores a 0,5 arcos-de-segundo. Para a aquisição de imagens de céu profundo o recurso a sistemas redutores de focal (normalmente f/6.3 ou f/3.3) conseguirá resoluções por pixel de valores superiores a 1,5~2 segundo-de-arcos, ou, caso o detector o permita, poder-se-á utilizar técnicas de “binning” que agrupando vários pixels num de maiores dimensões provocará o mesmo efeito.

(1) Lente “Barlow” – Lente negativa, côncava, que colocada no percurso óptico entre o telescópio e a ocular, ou detector, permite aumentar a ampliação e tornar a distância focal mais longa, geralmente por um factor de 2x a 3x.

3.2. QUALIDADE DE UM DETECTOR CCD

Para o sucesso na execução de astrofotografia importa conhecer com precisão o desempenho do detector utilizado, a fim de se poder tirar o máximo partido do sistema de aquisição de imagem. A qualidade de um detector é em geral avaliada através dos seguintes parâmetros: eficiência quântica, resposta espectral, linearidade, ruído e resolução espacial. Este último parâmetro já foi estudado na secção 3.1.2., sendo os restantes analisados nas secções que se seguem.

3.2.1. Eficiência Quântica:

Define-se eficiência quântica como a razão entre o número de fótons detectados e o número de fótons incidentes no detector. Sendo este formado por pixels, é usual definir a eficiência quântica (QE) de CCD's por:

$$QE = \frac{\text{média de fótons detectados / pixel / segundo}}{\text{média de fótons incidentes / pixel / segundo}} \quad (3.4)$$

Como a eficiência quântica é sempre menor que a unidade, nem todos os fótons incidentes conseguem gerar um electrão excitado. Nos detectores CCD comerciais a eficiência quântica varia de 40% a 80%, o que é notável comparativamente às emulsões fotográficas, cujo valor de 4% é o melhor que actualmente se consegue.

Contudo, mesmo que um fóton gere por efeito fotoeléctrico um electrão excitado no semiconductor do detector, este não será necessariamente medido na saída, uma vez que poderá ser perdido durante o processo de transferência ou nas flutuações de sinal gerados ao nível do andar de saída. Sendo assim, é preferível definir a eficiência quântica de detecção ("Detective Quantum Efficiency" – DQE), que relacionará o número de electrões medidos na saída de detector com o número de fótons incidentes, parâmetro mais adequado à realidade e portanto melhor critério de qualidade do detector.

O facto de ser $DQE < QE$, como acima exposto, está relacionado com a existência de ruído intrínseco do detector, assunto que será mais aprofundadamente discutido em secção posterior (3.2.4).

Alguns autores e fabricantes consideram que a DQE é uma expressão da sensibilidade do detector, definindo-a como a quantidade de carga eléctrica

detectada por unidade de energia luminosa incidente na superfície do detector e exprimindo-a em Coulombs/Joule ou, introduzindo a variável tempo, em Amperes/Watt (A / W). Outros autores e fabricantes preferem ainda definir a resposta do detector como a tensão na saída do detector, por unidade de energia luminosa incidente por unidade de tempo (potência da radiação incidente) e por unidade de área, exprimindo-a em V / $\mu\text{W} / \text{cm}^2$. É possível inter-relacionar todos estes parâmetros entre si, em virtude de a tensão no andar de saída do detector ser obtida aos terminais de um díodo (“floating diode” – secção 2.3) que se comporta como um condensador de capacidade equivalente C. Sendo $U=Q/C$, virá:

$$\text{Tensão de saída (V)} = \frac{q \cdot n_e}{C} \quad (3.5)$$

onde n_e representa o número de electrões contidos no pacote em leitura no andar de saída, $q=1,6 \times 10^{-19} \text{C}$ a carga do electrão. Será então:

$$\text{Resposta (V/}\mu\text{W/cm}^2) = 10^6 \times \frac{\text{Resposta (A/W)} \times \text{Superfície do pixel (cm}^2)}{\text{Capacidade equiv. díodo leitura (pF)}} \quad (3.6)$$

Por outro lado, sendo a energia do fotão incidente dada por:

$$E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3.7)$$

onde $h=6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ é a constante de Planck, $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$ a velocidade da luz e λ o comprimento de onda da radiação incidente, será possível exprimir a sensibilidade ou resposta em A / W, para determinado comprimento de onda, por:

$$\text{Resposta (A/W)} = \frac{n_e \cdot q}{n_f \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda}} \quad (3.8)$$

Sendo n_f o número de fotões incidentes e n_e/n_f a eficiência quântica de detecção, DQE, por definição, ter-se-á:

$$\text{DQE} = \frac{n_e}{n_f} = \text{Resposta (A/W)} \cdot \frac{h \cdot c}{q \cdot \lambda} \quad (3.9)$$

Concretizando os valores conhecidos, será finalmente:

$$\text{DQE(\%)} = 0,124 \cdot \frac{\text{Resposta (A/W)}}{\lambda \text{ (nm)}} \quad (3.10)$$

Como é evidente, é desejável que a eficiência quântica seja uniforme ao longo de toda a superfície sensível do detector. Qualquer variação local no valor de

QE apresenta-se como uma alteração de ganho de determinado pixel, provocando ruído na imagem final. Apesar dos esforços dos fabricantes, e como se viu na sessão 2.6.4, não é possível atingir uma uniformidade precisa na sensibilidade pela própria característica matricial discreta do detector – existem sempre variações de ganho de pixel para pixel, situação que ainda é ampliada pela eventual presença de poeiras no percurso óptico ou a existência de imperfeições ópticas. Contudo é possível corrigir esta não uniformidade nas imagens obtidas pelo detector, utilizando imagens de calibração obtidas a iluminação constante (“flat fields”) como será analisado posteriormente (Capítulos 5 e 6).

3.2.2. Resposta espectral:

A resposta espectral de um detector é representada pela variação da sensibilidade do detector com o comprimento de onda da radiação incidente.

Em virtude de a utilização de dispositivos CCD como detectores ópticos se basear no efeito fotoelétrico, o processo de detecção dependerá da energia dos fótons incidentes, que como evidenciado pela expressão (3.7) é função do comprimento de onda λ da radiação incidente. A sensibilidade do detector será então, também dependente do comprimento de onda da radiação conforme explicitado pela expressão (3.10).

Por outro lado, a possibilidade de um fóton incidente produzir um electrão excitado dependerá ainda da sua capacidade de penetração no semiconductor até à zona de depleção, de modo ao electrão produzido ser colectado no poço de potencial. O coeficiente de penetração dos fótons no semiconductor também varia com o seu comprimento de onda, sendo mais penetrantes os de maior valor (vermelhos) conforme se conclui da expressão (2.1), como já referido na secção 2.4. Nessa secção foram também abordadas tanto a técnica de impregnação da superfície sensível com uma camada de material fluorescente, como a construção de detectores CCD de iluminação de retaguarda, de modo a melhorar significativamente a resposta aos menores comprimentos de onda (azuis).

A figura 3.5 ilustra a resposta espectral de diversos tipos de detectores CCD. De notar a melhor eficiência dos CCD's com iluminação de retaguarda e a perda de eficiência dos detectores com “anti-blooming gates”.

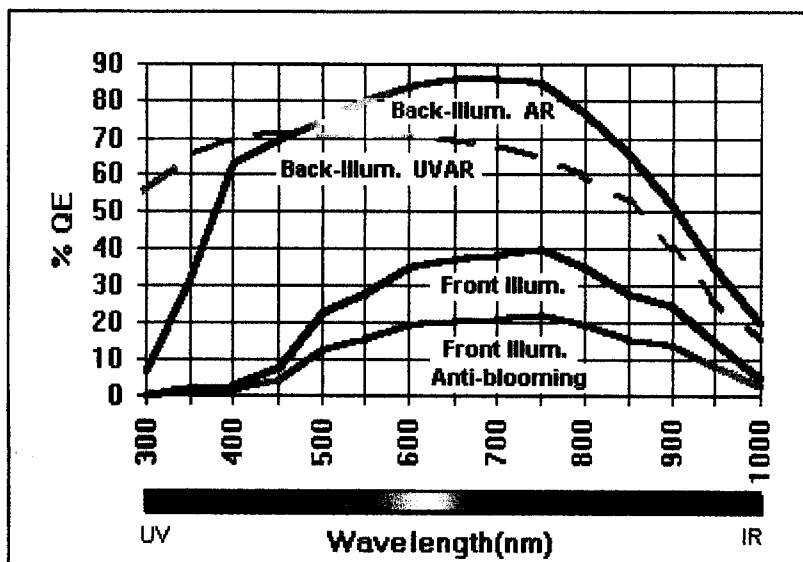


Figura 3.5 – Curvas típicas de resposta espectral para CCD's com iluminação frontal e de retaguarda apresentadas como a variação de eficiência Quântica em função do comprimento de onda da radiação incidente. [Ref. 29]

3.2.3. Linearidade:

Diz-se que um detector é linear quando o número de fótons medidos for proporcional ao número de fótons incidentes, ou de modo equivalente, para qualquer que seja a iluminação incidente E , a resposta S do detector verifica a relação:

$$S = K_1 \cdot E + K_2, \text{ com } K_1 \text{ e } K_2 \text{ constantes.}$$

Na prática, a linearidade está limitada a uma zona de trabalho, um intervalo de iluminação, conforme se pretende ilustrar com a figura 3.6.

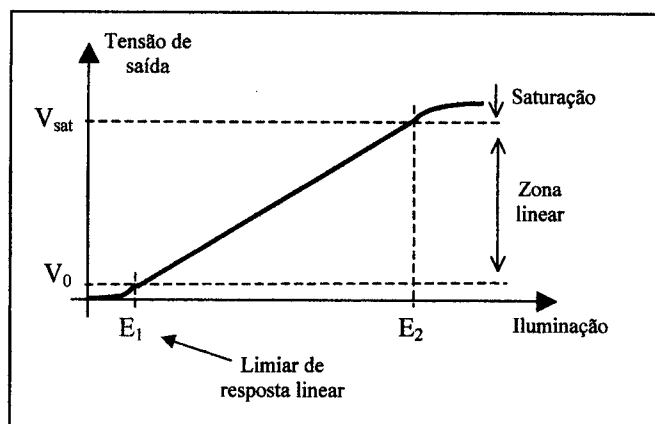


Figura 3.6 – Zona linear de um detector CCD, compreendida entre um limiar de resposta linear e a saturação.

Para baixos valores de iluminação não existe linearidade por se darem fenómenos de limiar, como o aprisionamento de cargas nas imperfeições das regiões de transição óxido – semicondutor. Com elevados níveis de iluminação o detector entra em situação de saturação e conseqüente “blooming”, quando os

poços de potencial se encontrarem totalmente preenchidos, conforme descrito na secção 2.6.2. De notar que a técnica de limitação do efeito de “blooming” pela introdução de “anti-blooming gates” reduz substancialmente a zona linear do detector CCD, conforme se encontra evidenciado na figura 3.7 (documentação técnica de “Texas Instruments Semiconductor”), onde se comparam as respostas de um detector com as “anti-blooming gates” inibidas e em funcionamento.

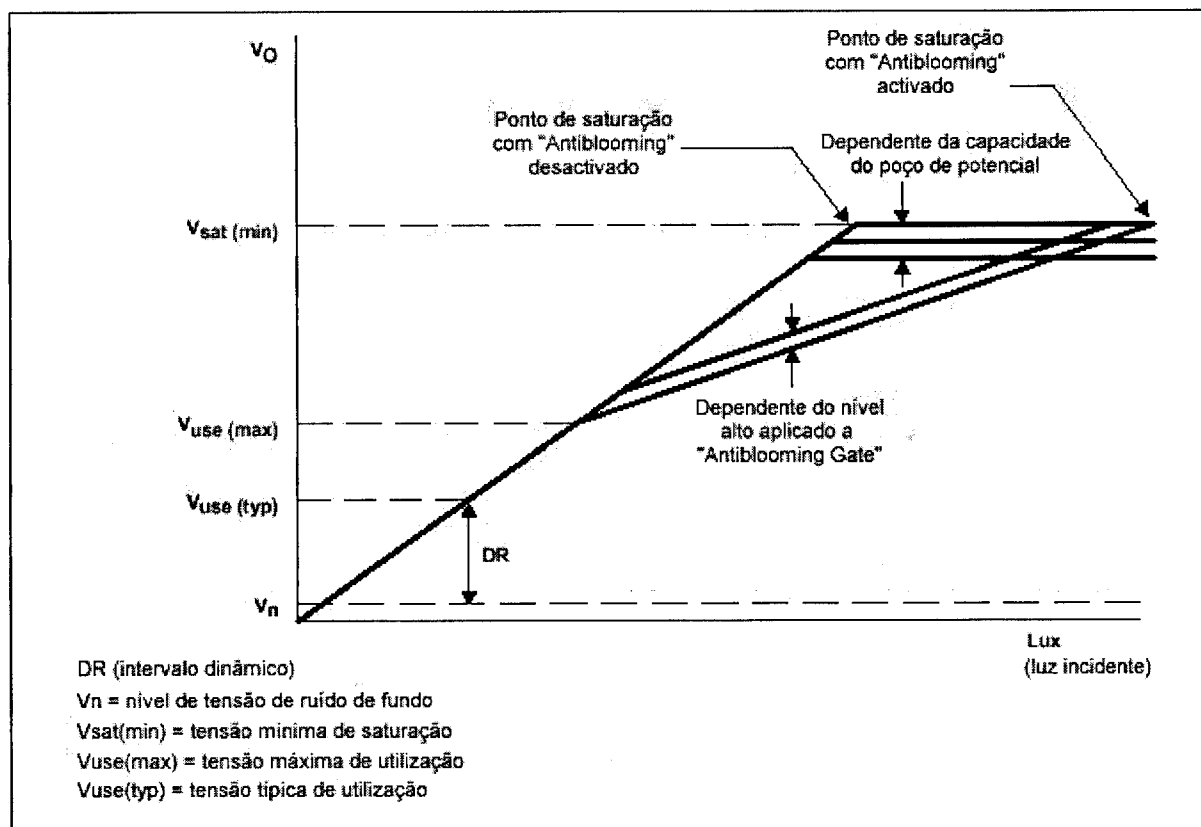


Figura 3.7 – O recurso a “anti-blooming gates” permite maiores níveis de iluminação sem atingir a saturação, mas reduz substancialmente a zona de funcionamento linear. Adaptado de [Ref. 26].

Em virtude dos detectores CCD serem dispositivos que realizam integração de luz durante o tempo de exposição, a linearidade constitui uma importante característica na medida que permite a comparação de observações e estudos fotométricos precisos. Sendo o detector linear pressupõe-se que o número de fótons detectados, ou electrões medidos, seja proporcional ao tempo de exposição. Por esse motivo é usual os fabricantes apresentarem os resultados dos testes de linearidade dos seus detectores como o número de electrões em função do tempo de exposição em condições de iluminação constante, conforme a figura 3.8.

Os detectores CCD têm um comportamento excelente, em termos de linearidade, comparativamente às emulsões fotográficas, pelo que são preferidos para aplicações fotométricas.

Convém também referir que o limiar da zona linear se confunde com o limiar de detectabilidade, isto é, a intensidade luminosa mínima detectável. Ou seja, o detector CCD, é praticamente linear a partir do momento em que consegue detectar radiação. O limiar de detectabilidade, é função do nível de ruído existente, assunto a ser abordado na secção seguinte.

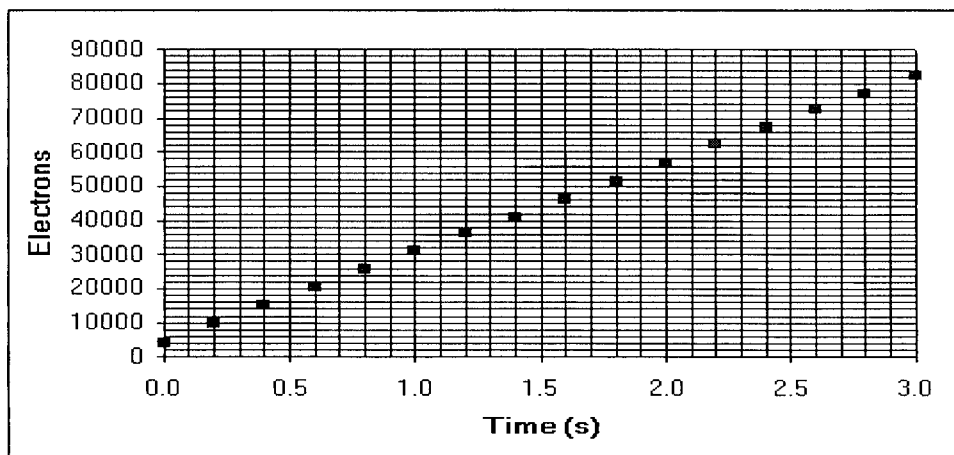


Figura 3.8 – A linearidade como o número de electrões medidos em função do tempo de exposição a iluminação constante. [Ref. 29].

3.2.4. Ruído e Relação Sinal - Ruído:

Quando se efectua uma medida de uma grandeza física, aquela vem sempre afectada de algum erro próprio do processo de medição. A detecção de radiação também não está isenta de incerteza, sob a forma de flutuações aleatórias do sinal medido, de origem diversa, que se designam genericamente por ruído. A qualidade do sinal detectado está intimamente ligada à relação entre a quantidade de informação obtida na detecção (sinal) e a incerteza inerente a essa informação (ruído). A imagem obtida por um detector CCD será tanto mais nítida e de melhor qualidade fotométrica (ou mesmo artística) quanto maior for o sinal comparativamente ao ruído. É, portanto, conveniente conhecer as origens do ruído nos detectores, de modo a conseguir limitá-lo e controlá-lo, maximizando a relação sinal – ruído (S/N).

Associados ao processo de detecção por um detector CCD, distinguem-se dois tipos de ruído – o ruído fotónico e o ruído do equipamento.

O ruído fotónico está associado ao ruído inerente aos próprios fotões detectados, em virtude da sua natureza estatística, propriedade fundamental da radiação: fotões provenientes de uma fonte perfeitamente constante, atingem o detector de modo aleatório, podendo-se demonstrar que a sua contagem n_f , num intervalo de tempo fixo, segue uma distribuição estatística de Poisson, para valores de n_f elevados.

A distribuição estatística de Poisson caracteriza-se por ter um desvio-padrão igual à raiz quadrada do valor médio. Isto é, supondo que se repetia a detecção de uma fonte constante, em condições análogas, repetidas vezes, encontrando-se um valor médio de contagem de número de fotões, n_f , a incerteza associada à contagem seria:

$$\Delta n_f = \sqrt{n_f} \quad (3.11)$$

pelo que o resultado da medição poderia ser expresso por $n_f \pm \sqrt{n_f}$ e a relação sinal-ruído por:

$$\frac{S}{N} = \frac{n_f}{\sqrt{n_f}} = \sqrt{n_f} \quad (3.12)$$

O valor encontrado na anterior expressão constitui o limite máximo teórico da relação sinal-ruído que se pode obter numa detecção fotónica, visto o ruído considerado ser propriedade intrínseca do objecto observado (fotões) e não incluir termos respeitantes ao equipamento de detecção. Seria a relação sinal-ruído que se obteria por um detector perfeito, em condições ideais de observação, isto é, com a fonte de fotões observada isolada sobre um fundo não radiante.

Ora tal não é possível, e na detecção de objectos astronómicos chegam ao detector fotões com origem diversa do objecto em estudo, tanto provenientes do fundo celeste, como da dispersão atmosférica de radiação de outros objectos celestes (a Lua, por exemplo) ou mesmo da poluição luminosa. Esta forma de ruído é conhecida como ruído fotónico do céu, tem uma distribuição estatística idêntica ao ruído fotónico do objecto, antes considerado, e degrada a relação sinal-ruído.

Por outro lado, os detectores CCD não são perfeitos, contribuindo para a degradação da relação sinal – ruído (S/N) com um termo próprio designado por ruído do equipamento, que se deve ao facto de na saída do detector não se conseguir realizar uma leitura exacta do número de electrões gerados em cada pixel

por efeito fotoelétrico, o que é atribuído a duas causas distintas: uma é responsável pela existência de cargas detectadas na saída mesmo quando o detector não se encontra exposto a qualquer radiação luminosa – “dark current”, assunto já abordado anteriormente na secção 2.1.3; a outra está relacionada com a existência de sinal na saída do detector quando se realiza uma leitura da matriz após tempo de exposição nulo – “bias”.

Como discutido na secção 2.1.3 um fotoelemento de um detector CCD gera carga eléctrica independentemente da presença de qualquer energia luminosa, em virtude da geração de pares electrão – lacuna no semiconductor por efeito térmico. Este fenómeno, característico do semiconductor, depende fortemente da temperatura e aumenta linearmente com o tempo de exposição. As cargas assim geradas denominam-se por cargas térmicas ou “dark current”, e acumulando-se nos poços de potencial conjuntamente com as cargas geradas por efeito fotoelétrico, contribuem para que se atinja mais rapidamente o estado de saturação, especialmente em situações de operação com tempos de exposição demasiado longos ou temperaturas de funcionamento elevadas. Este aspecto negativo pode ser limitado, embora não anulado, seja pelo arrefecimento forçado do detector, seja pela utilização de tempos de exposição mais curtos, ou ainda recorrendo a detectores desenhados especialmente para o efeito com base em tecnologias MPP (secção 2.6.5).

Contudo este fenómeno é reproduzível, isto é, o seu valor médio pode ser inferido através de uma exposição de igual duração, realizada à mesma temperatura, na ausência de luz, “dark frame”. Assim, por subtracção, é possível recuperar o sinal devido apenas às cargas fotónicas, existente numa imagem. Mas, para cada pixel da imagem, o número existente de cargas térmicas só pode ser determinado à parte de uma determinada incerteza, fruto da sua natureza estatística. Na realidade os electrões termicamente gerados também respeitam uma distribuição estatística de Poisson, pelo que se a cada pixel de uma imagem se retirar por subtracção o valor médio da carga térmica, resta uma incerteza igual à raiz quadrada do seu número médio, ruído térmico. A figura 3.9 representa a evolução do número de cargas térmicas geradas e do ruído térmico em função do tempo de exposição. Como é evidente, esta componente do ruído do equipamento poderá ser reduzida, diminuindo o número de cargas térmicas geradas, utilizando os procedimentos para tal acima descritos.

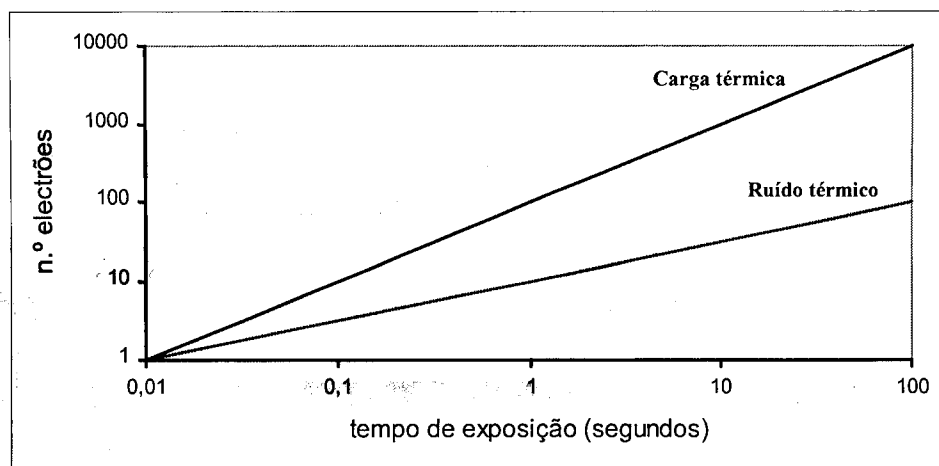


Figura 3.9 – Carga térmica e Ruído térmico em função do tempo de exposição (escalas logarítmicas).

Finalmente, a última componente do ruído do equipamento designa-se por ruído de leitura ou “read-out noise” e deve-se aos sistemas electrónicos constituintes da câmara CCD. Três factores contribuem para que haja incerteza de carácter aleatório na quantidade de carga detectada face à carga gerada nos fotoelementos: ineficiência de transferência, ruído electrónico e ruído de quantificação.

A ineficiência de transferência resulta do facto de existirem perdas de carga durante o processo de transferência entre um fotoelemento e o andar de saída do detector CCD, conforme foi referido na secção 2.2.3, fundamentalmente devidas a fenómenos de aprisionamento de cargas nas imperfeições e impurezas existentes nas superfícies de transição óxido – semicondutor. Embora no estado actual de tecnologia se consiga valores de eficiência de transferência da ordem de 0,99999, o que corresponde à perda de em média um electrão em cada 10^5 por transferência, convém notar que após 300 transferências de um pacote com inicialmente 10^4 electrões (valores comuns em detectores CCD), chegarão ao andar de saída:

$10^4 \times (1-10^{-5})^{300} = 9970$ electrões, o que corresponde à perda de 30 electrões, ou seja um erro de 0,3%.

A leitura da quantidade de carga existente em cada pacote no andar de saída, como referido na secção 2.3, baseia-se na comparação entre a tensão desenvolvida por carregamento capacitivo do “floating diode” pelas cargas e um nível de tensão de referência (“reset level”). Ora tal mecanismo de leitura não é isento de incertezas em virtude da impossibilidade de manter tanto a tensão de referência, como a

capacidade equivalente do díodo de saída, exactamente constantes. Embora existam métodos mais rigorosos de leitura dos pacotes de carga (“Double Correlated Sampling”), analisados no Capítulo 4, capazes de anular esta imprecisão de leitura, o sinal vídeo analógico resultante será sempre corrompido por ruído electrónico próprio dos componentes, durante a sua amplificação e transmissão.

Por último, o processo de digitalização do sinal vídeo analógico num conversor analógico-digital (ADC), consiste em amostrar o sinal analógico (valor real) em valores inteiros que formarão a matriz digital da imagem, ou seja, a infinidade de valores possíveis do sinal analógico é traduzida por uma quantidade finita de informação. Concretizando, se a amplitude máxima do sinal presente na entrada do conversor for U_{max} e se forem utilizados n bits para a codificação digital do sinal, então cada passo de quantificação, p , será dado por:

$$p = \frac{U_{max}}{2^n} \quad (3.13)$$

também designado por passo de codificação ou unidade analógico-digital (ADU), o que introduz um erro máximo de $\pm p/2$, constituindo outra fonte de ruído, o ruído de quantificação.

O ruído de leitura, cujas origens se procuraram especificar nos parágrafos anteriores, tem um carácter distinto das outras fontes de ruído presentes no processo de detecção. Como não resulta directamente de uma contagem de partículas num intervalo de tempo limitado não lhe pode ser atribuída uma distribuição estatística de Poisson, e, por outro lado, não será dependente do tempo de exposição, isto é, o seu nível mantém-se constante, mesmo para uma exposição de duração nula.

Na figura 3.10 comparam-se e somam-se as diferentes componentes do ruído do equipamento, permitindo compreender que para exposições de curta duração domina o ruído de leitura, “read-out noise”, enquanto que para longas exposições é o ruído térmico que prevalece.

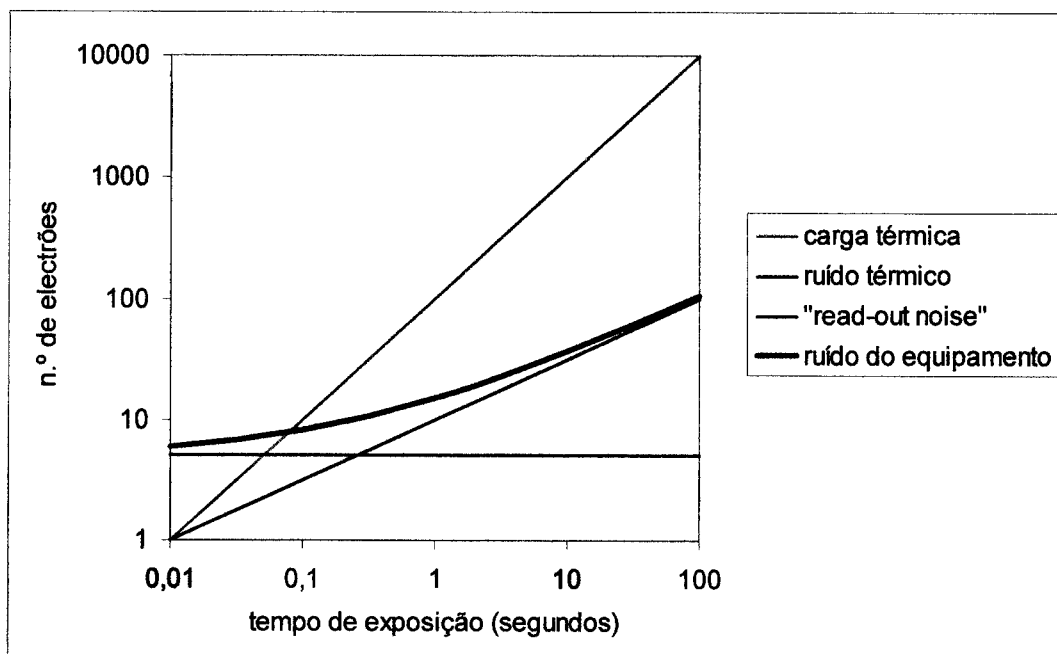


Figura 3.10 – Sobreposição das diferentes componentes do ruído do equipamento.

Caracterizadas as principais fontes de ruído presentes num processo de detecção de radiação, interessa conhecer como se conjugam para degradar a relação sinal-ruído, compreender a necessidade de redução da observação de modo a isolar o sinal pretendido e inferir técnicas de limitação do tipo de ruído dominante em cada observação, com a finalidade de obter informação de melhor qualidade, ou maior relação sinal-ruído.

Seja, então, S_o o sinal devido ao objecto, S_s o sinal resultante dos fótons provenientes de outras origens (fundo celeste, dispersão atmosférica da poluição luminosa, etc...), S_d a carga térmica e S_b o sinal "bias" do detector, existente mesmo para exposições de duração nula. O sinal resultante de cada pacote de cargas terá as seguintes componentes:

$$S = S_o + S_s + S_d + S_b \quad (3.14)$$

Associadas a estes valores de sinal existem as incertezas respectivas: N_o , ruído fotónico do objecto; N_s , ruído fotónico de fundo; N_d , ruído térmico; e N_r , ruído de leitura ou "read-out noise". Sendo independentes e não correlacionados entre si somam-se em quadratura, pelo que o ruído total presente será:

$$N^2 = N_o^2 + N_s^2 + N_d^2 + N_r^2 \quad (3.15)$$

Ora, como já referido as três primeiras componentes do ruído têm distribuições estatísticas de Poisson, pelo que: $N_o^2 = S_o$, $N_s^2 = S_s$ e $N_d^2 = S_d$, vindo:

$$\left(\frac{S}{N}\right) = \frac{S_o + S_s + S_d + S_b}{\sqrt{S_o + S_s + S_d + N_r^2}} \quad (3.16)$$

A expressão (3.14) mostra a necessidade de tratamento da observação obtida, com o intuito de retirar as várias fontes de sinal indesejável, isolando a componente relativa ao objecto. Tal é possível por subtracção do sinal total das componentes não respeitantes ao objecto, que se obtêm realizando mapas de pixels em condições controladas: É possível inferir o valor médio de S_d realizando uma exposição à mesma temperatura e de igual duração mas sem a presença de fontes luminosas ("dark frame"); O valor médio de S_b , pode ser obtido pela média dos sinais provenientes de várias exposições de duração nula ("bias frame"); finalmente, o valor médio de S_s pode ser estimado pela média do sinal presente em vários pixels onde não foi integrada radiação proveniente do objecto. Seja então, C_o a contagem de cargas num pixel após o tratamento da observação e considere-se C_s , como a contagem de cargas respeitantes às contribuições combinadas da carga térmica e do fundo celeste. Deste modo poder-se-á escrever:

$$\left(\frac{S}{N}\right) = \frac{C_o}{\sqrt{C_o + C_s + N_r^2}} \quad (3.17)$$

ou,

$$\left(\frac{S}{N}\right) = \frac{\sqrt{C_o}}{\sqrt{1 + \frac{C_s}{C_o} + \frac{N_r^2}{C_o}}} = \frac{\sqrt{C_o}}{\sqrt{1 + \Delta}} \quad (3.18)$$

com

$$\Delta = \frac{C_s}{C_o} + \frac{N_r^2}{C_o} \quad (3.19)$$

Note-se que o numerador de (3.18) corresponde ao limite máximo da relação S/N obtido para um detector perfeito (cf. 3.12), pelo que Δ será o factor de degradação da relação sinal-ruído. Da análise de (3.19) pode-se concluir essa

degradação diminui quanto maior for a contagem da carga devida ao objecto, o que se consegue com:

- a) telescópio de maior abertura;
- b) óptica de razão focal mais rápida, isto é, menor f/D ;
- c) detector CCD de melhor eficiência quântica;
- d) necessidade de manter o percurso óptico limpo de poeiras;
- e) a soma de diversas exposições ("stacking").

Por outro lado, a primeira parcela de Δ em (3.19) depende do tempo de exposição, enquanto a segunda é independente, pelo que em exposições de curta duração prevalece o termo relativo ao ruído de leitura (observação limitada por "read-out noise"), enquanto que, para longas exposições, domina o primeiro termo, relativo ao ruído de fundo celeste e às cargas térmicas (observação limitada por ruído de fundo).

Pelo exposto é agora possível estabelecer o limiar de detectabilidade de um detector CCD, isto é, o nível mínimo de sinal detectável, que dependerá do ruído sempre presente ("read-out noise"). É usual considerar que um sinal é detectável quando a relação sinal-ruído (S/N) for maior que 3, pelo que se pode concluir que o limiar de detectabilidade corresponderá a um sinal três vezes superior ao ruído de leitura.

3.3. ELECTRÓNICA DE UMA CÂMARA CCD

Como referido na secção 2.2, o mecanismo de transferência de cargas e a sua consequente leitura num detector CCD processam-se através do envio de um conjunto de sinais eléctricos, designados por “clocks”, sincronizados entre si e específicos para cada tipo de detector. Em cada ciclo de “clock” aplicado ao registo horizontal, o andar de saída fornece uma tensão eléctrica proporcional à quantidade de carga detectada na leitura de um determinado pixel. A sequência destas tensões eléctricas constitui o sinal vídeo de saída que, após conveniente amplificação, será digitalizado num conversor analógico-digital. A figura 3.11 representa o diagrama de blocos de uma possível arquitectura dos sistemas electrónicos subjacentes a um detector CCD.

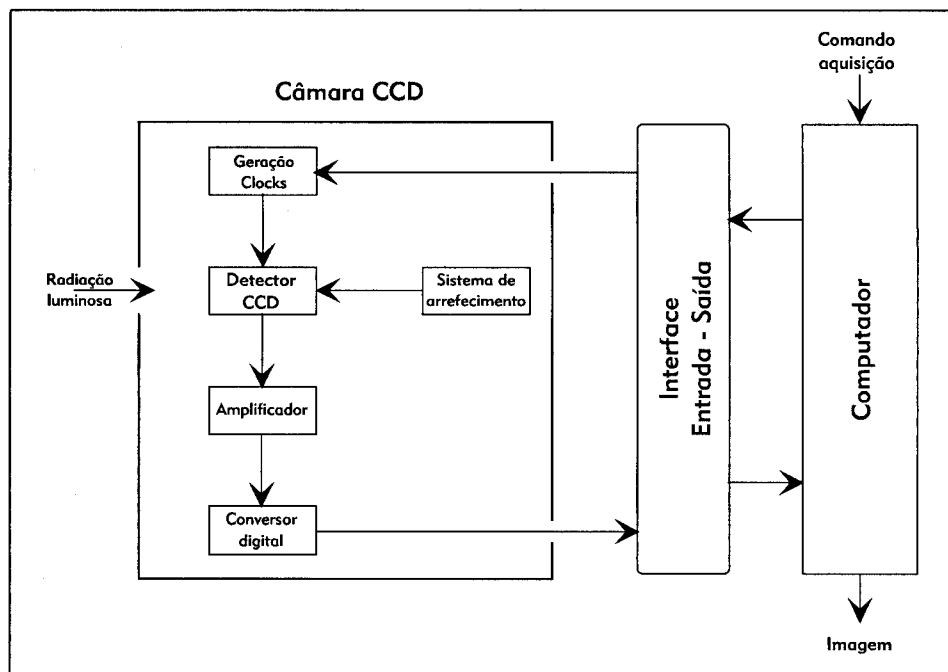


Figura 3.11 – Diagrama de blocos dos sistemas electrónicos necessários ao funcionamento de um detector CCD.

Embora sejam possíveis diversas arquitecturas para os sistemas electrónicos de uma câmara CCD, a esquematizada na figura 3.11 revela-se a mais simples e é a mais utilizada em câmaras comerciais típicas para utilizações amadoras e de divulgação, por ser mais flexível e económica. A flexibilidade desta configuração advém do facto de a sequência temporal de “clocks” e respectiva sincronização ser realizada por software no computador e transferida para a câmara através da porta de comunicações paralela bidireccional (usualmente destinada à comunicação com

uma impressora), que constitui a interface de entrada - saída. O bloco de geração de “Clocks” recebe as seqüências temporais e apenas lhes confere os níveis de tensão adequados ao ataque do “chip” detector em questão. O sinal vídeo obtido na saída de detector é pré-amplificado de modo aos seus níveis serem compatíveis com o conversor analógico-digital. Este converte o sinal analógico em seqüências de valores digitais que serão transferidas para o computador através da mesma porta de comunicações (agora a funcionar em sentido oposto).

Neste tipo de arquitectura, o computador desempenha um papel fundamental, pois além de funcionar como memória de armazenamento da matriz de imagem final, permite controlar as diversas operações do detector – limpeza da matriz de pixels, integração e leitura, através de um programa de controlo que gera os necessários diagramas temporais. A título de exemplo, apresentam-se na figura 3.12 os diagramas temporais respeitantes às operações de integração e leitura para um detector “Texas Instruments” TC211, documento fornecido pelo fabricante do “chip” detector, no qual o projectista de uma câmara CCD se baseia para a concepção do software de controlo.

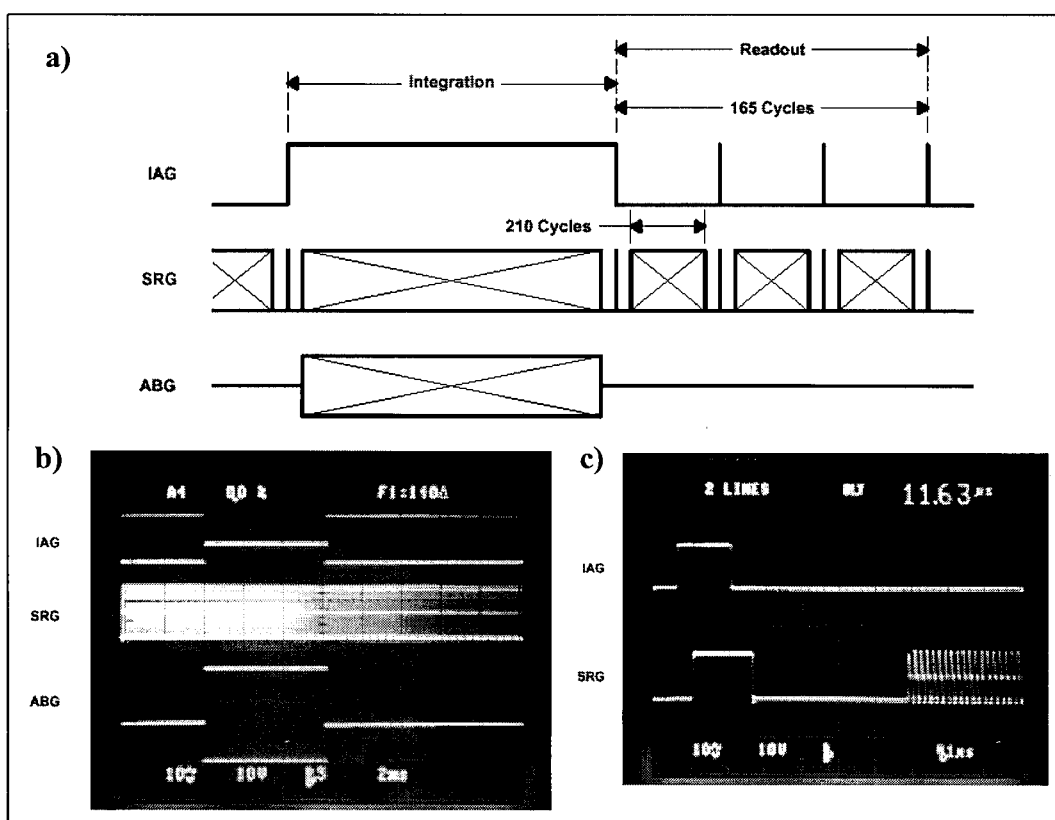


Figura 3.12 – Diagrama temporal respeitante às operações de integração e leitura para um “chip” detector TC211: a) Diagrama geral; b) Formas de onda durante o período de integração; c) Formas de onda relativas à leitura de uma linha no registo horizontal.

Para permitir a correcta interpretação da figura 3.12, referem-se os seguintes dados específicos do detector:

O detector TC211 é um dispositivo tipo “full-frame”, constituído por 165 linhas de 192 pixels cada, com controlo de saturação por “anti-blooming gates”;

Durante o período de integração o sinal IAG (“Image Area Gate”) é mantido num nível intermédio de modo a permitir a formação de poços de potencial para armazenamento das cargas entretanto geradas; o sinal ABG (“Anti-Blooming Gate”) deverá possuir uma frequência de 2 MHz de modo à protecção contra o efeito “blooming” ser eficazmente realizada, isto é, prevenir que as cargas existentes em poços de potencial saturados se espaiem pelos poços vizinhos; o sinal SRG (“Serial Register Gate”), aplicado ao registo horizontal, permite manter o nó de detecção do andar de saída correctamente carregado e prevenir a formação de cargas térmicas no registo horizontal;

O período de leitura é constituído por duas fases distintas, a transferência de linhas e o deslocamento série no registo horizontal; serão necessários 165 ciclos em IAG para realizar a transferência da totalidade de linhas da zona de imagem para o registo horizontal (165 linhas); por cada um desses ciclos procede-se ao deslocamento série do registo horizontal e conseqüente detecção de carga no andar de saída, sendo necessários 210 impulsos do sinal SRG (192 pixels activos + 18 pixels de referência / linha).

Devido à sua influência na qualidade global de uma câmara CCD, convém analisar com maior pormenor o funcionamento do bloco de conversão digital (figura 3.11), que é basicamente constituído por um conversor analógico-digital (ADC).

O sinal vídeo pré-amplificado consiste numa tensão analógica, isto é, varia continuamente e pode tomar qualquer valor real num intervalo limitado (desde 0 Volts à tensão de saturação do amplificador). O circuito ADC tem por funções a amostragem desse sinal, que consiste em tomar o seu valor em instantes discretos, e a sua digitalização, isto é, a quantificação e codificação do valor de cada amostragem com determinado número de dígitos binários (bits).

A amostragem do sinal vídeo deverá ser executada ao mesmo ritmo do sinal de “clock” que actua no registo horizontal do detector, permitindo uma amostragem por pixel lido. A quantificação do sinal, depende do número de bits utilizado, e limita a qualidade da conversão, uma vez que à infinidade de valores possíveis do sinal

original, faz corresponder um conjunto finito de níveis de quantificação, conforme se pretende ilustrar na figura 3.13.

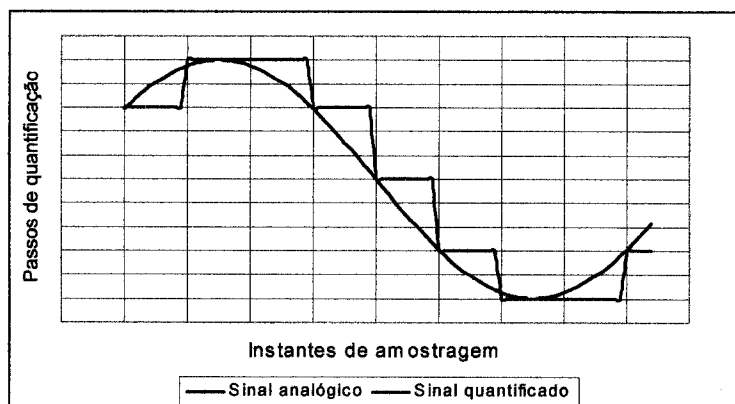


Figura 3.13 – Processo de amostragem e quantificação de um sinal analógico.

Supondo que o sinal analógico presente à entrada do circuito ADC tem uma variação dinâmica entre 0 e +10 Volts, e que se utilizam 8 bits na digitalização, existirão $2^8 = 256$ níveis de quantificação e cada passo de quantificação corresponderá a $10V / 256 \approx 39$ mV, o que se designa por passo de codificação ou Unidade Analógico – Digital (ADU). A tabela 3.4 relaciona o número de bits utilizados na codificação com o número de níveis de quantificação e correspondente ADU, para uma variação dinâmica do sinal analógico de 10 Volts.

N.º bits codificação	5	6	7	8	10	12	14	16
Níveis quantificação	32	64	128	256	1024	4096	16384	65536
ADU (mV)	312,5	156,3	78,1	39,0	9,77	2,44	0,61	0,15

Tabela 3.4 – Relação entre o número de bits utilizados na codificação e número de níveis de quantificação do sinal.

Quanto maior for o número de bits utilizados menor será o passo de quantificação, pelo que a réplica digital do sinal analógico será mais precisa, diminuindo o erro de quantificação (cf. com secção 3.2.4 e expressão 3.13). Deste modo o parâmetro número de bits do ADC será fundamental para a avaliação da qualidade de uma câmara CCD. Contudo quanto maior for esse número mais dispendioso se torna o circuito e mais lento será o processo de conversão digital, o que implica uma leitura mais lenta do detector. Por outro lado o conhecimento deste parâmetro revela-se importante na análise e processamento da imagem final, pois está directamente relacionado com o número de níveis de cinzento com que será representada no écran e com a dimensão do ficheiro correspondente.

3.4. ASPECTOS TÉRMICOS – ARREFECIMENTO

Conforme discutido anteriormente (secção 2.1.3) a operação correcta de um detector CCD obriga ao seu arrefecimento, de modo a aumentar os tempos de relaxação térmica do semiconductor para valores superiores aos tempos de aquisição de imagem requeridos, permitindo diminuir a geração de cargas térmicas e o correspondente ruído térmico.

Em equipamento profissional usa-se um reservatório de azoto líquido junto ao detector CCD. Contudo esta solução é impraticável em equipamento amador em virtude da dificuldade de manipulação do azoto líquido.

Recorre-se então, a dispositivos termoeléctricos, cujo funcionamento se baseia no efeito de Peltier, que consiste na absorção ou dissipação de calor na junção de dois metais diferentes quando percorrida por corrente eléctrica num sentido específico. Estes dispositivos designam-se por módulos de Peltier e são constituídos por pares de materiais semicondutores com dopagens tipo N e P, juntos através de pontes de cobre (figura 3.14a). Vários elementos são montados entre duas superfícies cerâmicas que proporcionam boa conductividade térmica e estabilidade mecânica, assegurando ainda o isolamento eléctrico entre os elementos constituintes (figura 3.14b).

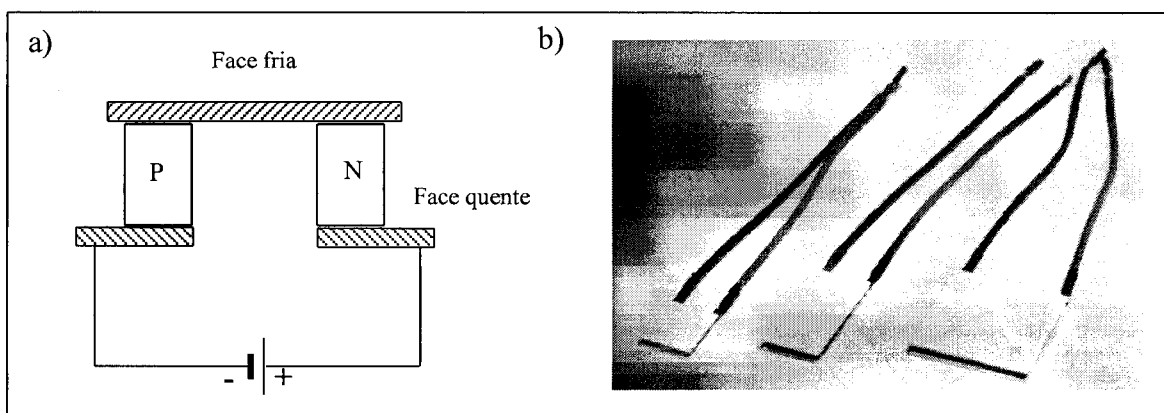


Figura 3.14 – a) Elemento de Peltier; b) Módulos de Peltier comerciais.

O módulo termoeléctrico de Peltier actua como uma bomba de calor, absorvendo calor na face fria e transportando-o até à face quente, que deverá ser montada de modo a poder radiar eficientemente o calor acumulando.

Baseando-se o efeito de Peltier no transporte da energia térmica por electrões que circulam na junção de dois metais diferentes, o efeito deverá aumentar com o aumento da corrente eléctrica. Contudo, o aumento da corrente eléctrica implica o aumento da energia dissipada por efeito de Joule, obrigando à dissipação de maior quantidade de calor ou ao aquecimento do elemento de Peltier, pelo que a corrente eléctrica que percorre o elemento deverá ser regulada de modo a permitir bombear efectivamente potência térmica entre as superfícies, aumentando o seu diferencial de temperatura.

A figura 3.15 relaciona, para um módulo de Peltier típico, a potência térmica bombeada com o diferencial de temperatura entre as superfícies, em função da potência eléctrica consumida.

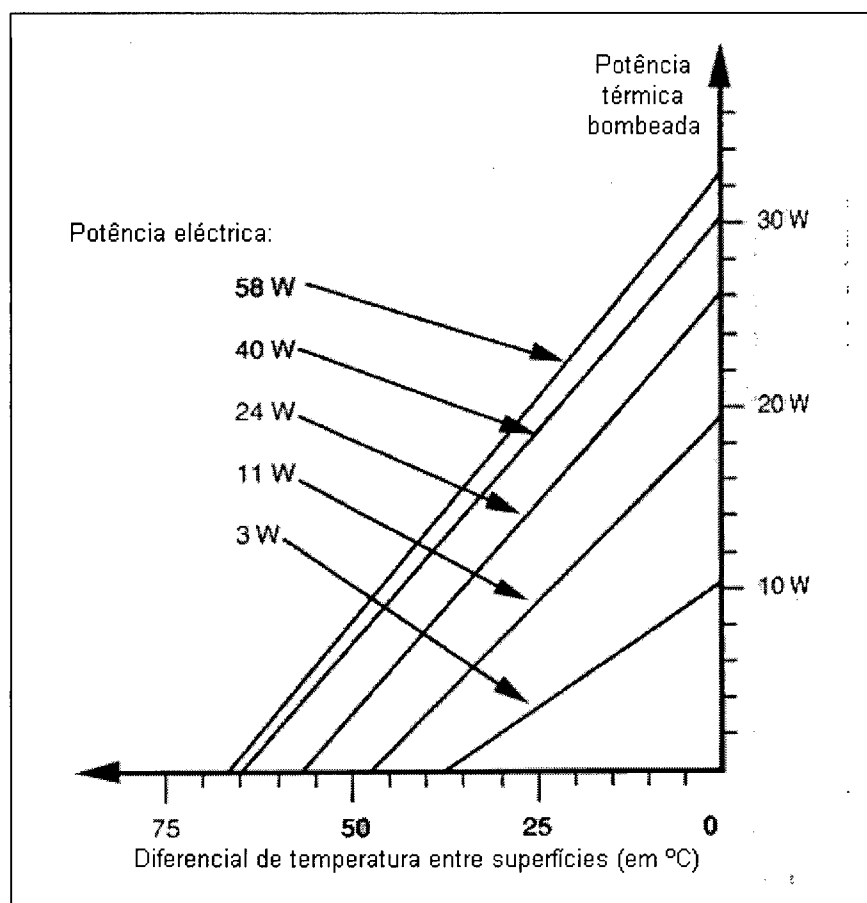


Figura 3.15 – Rendimento térmico / eléctrico de um módulo de Peltier típico.

3.5. ASPECTOS MECÂNICOS

Em virtude da necessidade de arrefecimento forçado do detector CCD, podem ocorrer fenómenos de condensação, embaciando a superfície fotosensível do detector. De modo a obviar tal problema é usual encerrar o corpo da câmara numa estrutura mecânica estanque, no interior da qual se produz vácuo recorrendo a bombas, ou se enche com uma atmosfera inerte de azoto ou árgon. Tais soluções, utilizadas em sistemas profissionais, são demasiado onerosas em equipamento amador, pelo que se pode recorrer a pacotes de gel de sílica capazes de absorver a humidade do ar e assegurando-se a estanquicidade do corpo da câmara.

Conforme discutido anteriormente (secção 2.5.2), pode ser necessário o recurso a um obturador mecânico (“shutter”) sincronizado com os tempos de integração de modo a evitar a corrupção da imagem por fontes luminosas intensas durante o processo de transferência de cargas (detectores CCD tipo “frame transfer”).

A figura 3.16 mostra uma solução possível para a construção do corpo de uma câmara, respeitando as condições referidas.

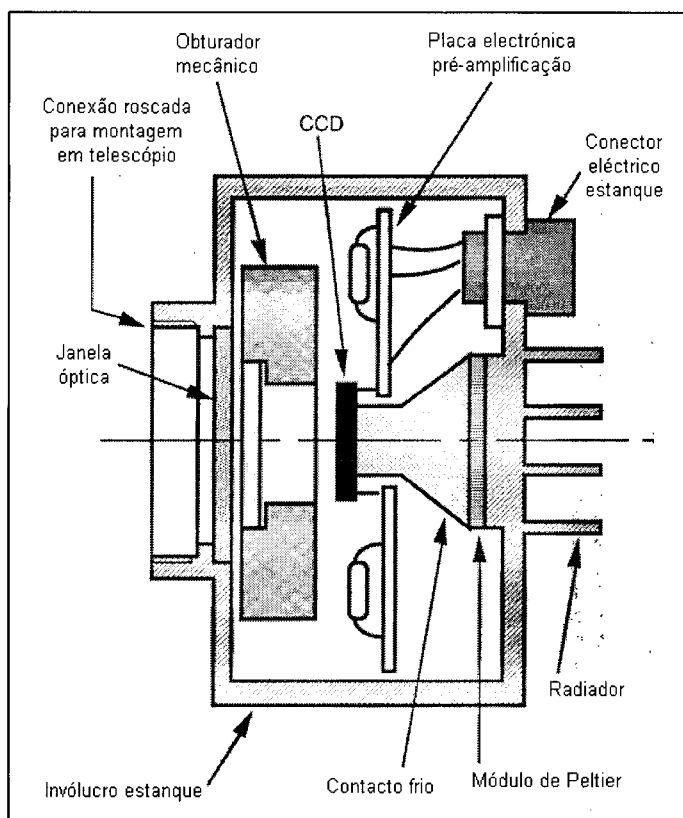


Figura 3.16 – Esquema de construção do corpo de uma câmara CCD.

- CAPÍTULO 4 -

CONSTRUÇÃO E ESTUDO COMPARATIVO
DE CÂMARAS CCD

4. CONSTRUÇÃO E ESTUDO COMPARATIVO DE CÂMARAS CCD

Os detectores CCD proporcionam linearidade, larga resposta espectral e grande sensibilidade a fontes de luz ténues, características necessárias para a obtenção de imagens astronómicas de elevada qualidade, pelo que revolucionaram as técnicas de detecção de objectos astronómicos a partir da década de 1980, embora o preço proibitivo dos detectores de grandes dimensões tornasse a sua utilização restrita a aplicações de carácter profissional. Contudo a vasta disseminação comercial de “chips” CCD de menores dimensões, nomeadamente em dispositivos de vídeo doméstico, a partir do início da década de 1990, motivou que se pensasse na possibilidade da sua adaptação a câmaras CCD astronómicas de baixo custo, permitindo a sua utilização em aplicações amadoras e de divulgação.

Considerando ainda que toda a abordagem teórica realizada nos capítulos anteriores deverá ser complementada com o estudo experimental de câmaras CCD reais e do seu desempenho operacional, no presente capítulo será abordada a construção de uma câmara CCD de baixo custo, analisada a possibilidade de adaptação de uma pequena câmara de vídeo digital à aquisição de imagem astronómica e finalmente estudado o desempenho de uma câmara comercial especialmente desenhada para astrofotografia amadora.

Deste modo será possível realizar o estudo operacional comparativo das três câmaras disponíveis, permitindo ainda explorar a viabilidade de execução de projectos tecnológicos promotores de interdisciplinaridade em contexto escolar, privilegiando a experimentação e o saber fazer em detrimento do saber teórico.

Por outro lado, a execução destes projectos práticos permite a aquisição de conhecimentos aprofundados sobre o funcionamento dos detectores, o que se revela útil nas fases de operação em observação e posterior tratamento das imagens obtidas, desenvolvendo ainda aptidões fundamentais para a resolução dos problemas práticos que surgem na adaptação dos diversos equipamentos utilizados e concepção de dispositivos de apoio à observação astronómica.

4.1. CONSTRUÇÃO DE UMA CÂMARA “COOKBOOK CB245”

A câmara “Cookbook CB245” foi projectada por Richard Berry, Veikko Kanto e John Munger como um dispositivo experimental destinado a ser montado pelo próprio utilizador, tendo para tal editado a obra referenciada em [2] na bibliografia, com todas as instruções e procedimentos de execução e montagem, de estilo tipo “do-it-yourself”.

O projecto baseia-se no detector Texas Instruments TC245, considerado obsoleto pelo fabricante e actualmente em estado de produção descontinuada, pelo que se torna complicado adquiri-lo nos circuitos comerciais normais, assim como o conversor analógico-digital de 12 bits proposto no projecto (AD1674 JN) e o módulo de Peltier (“Melcor” CP1.4-71-06L). A montagem dos componentes electrónicos efectua-se sobre duas placas de circuito impresso de dupla face, cuja produção de unidades isoladas por meios não profissionais torna-se complexa e sem a qualidade requerida, embora na obra sejam disponibilizadas as máscaras para foto-impressão. Por outro lado, a execução das peças metálicas que constituem o corpo da câmara, embora não sejam complexas e estejam suficientemente bem desenhadas na obra de referência, exige a manipulação de tornos mecânicos e aptidões de serralharia que não estarão ao alcance de todos os interessados na prossecução do projecto, sendo necessário recorrer ao apoio especializado de terceiros.

Face a estas limitações, optou-se pela importação um “Kit” disponibilizado pela empresa norte-americana “University Optics, Inc.” [Ref. 31], que inclui as peças maquinadas, as placas de circuito impresso, os componentes electrónicos necessários, o módulo de Peltier e alguns itens relativos ao sistema de arrefecimento e que orçou em US\$580 + taxas alfandegárias.

Esta secção constitui um relatório da montagem do “Kit” referido, procurando facilitar o empreendimento a todos os possíveis interessados em repetir tal aventura, salientando que pode constituir uma tarefa com interesse para aplicar no âmbito de um projecto de Área-escola ou das actividades de um Clube de Ciência ou Tecnologia ao nível do Ensino Secundário, em virtude de apelar ao desenvolvimento de inúmeras aptidões manuais, competências técnicas e organizativas e à promoção da interdisciplinaridade.

4.1.1. Projecto Geral da Câmara:

Na figura 4.1 apresenta-se o diagrama de blocos geral da câmara a construir, onde se identificam os seus sistemas constituintes principais e respectivas interligações.

No corpo da câmara fica montado o “chip” detector de modo a ser refrigerado por acção do módulo de Peltier, sendo a extracção de calor assegurada por circulação de um fluido de refrigeração.

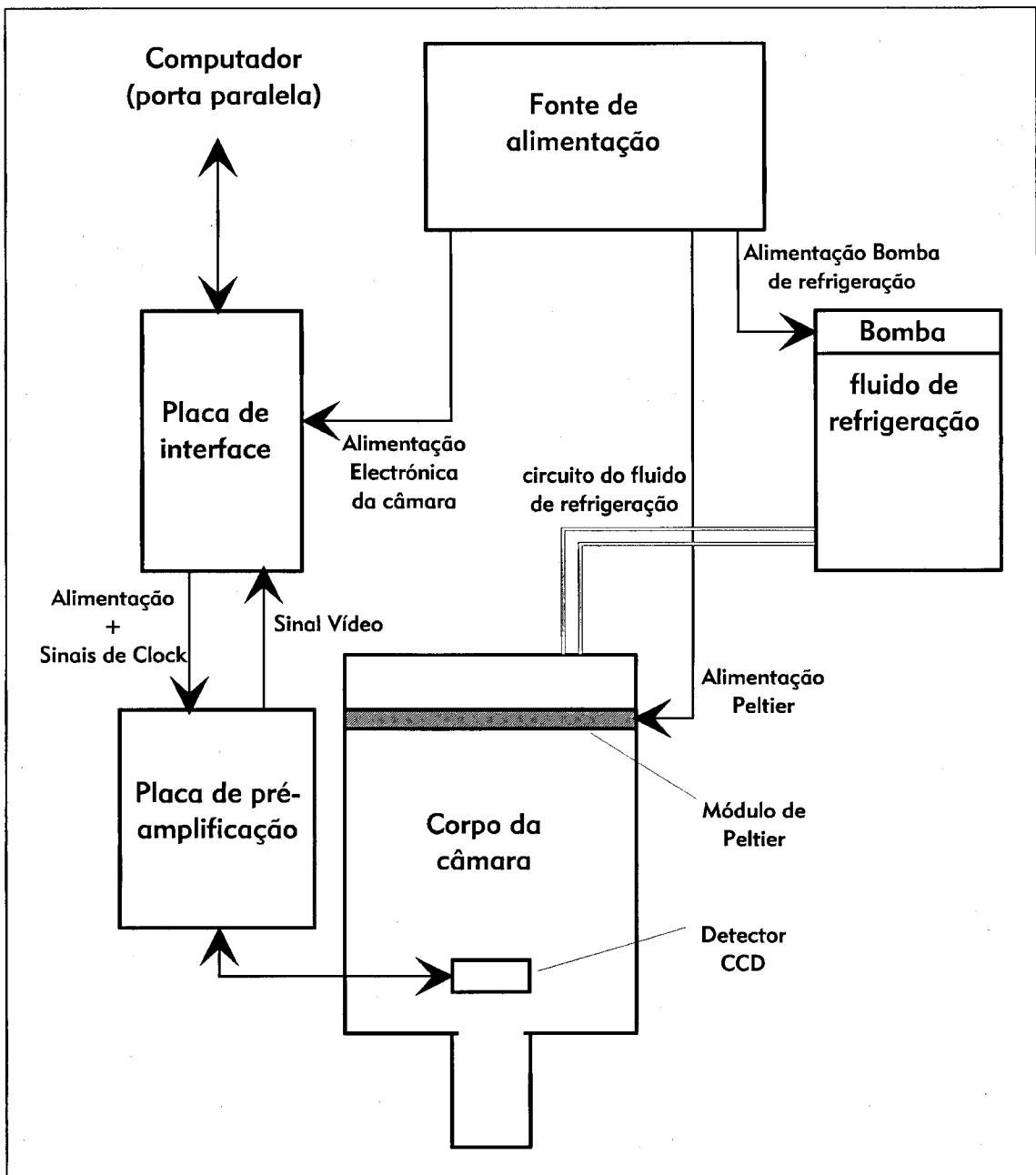


Figura 4.1 – Diagrama de blocos da câmara “Cookbook CB245”.

O sistema electrónico da câmara é composto por duas placas de circuito impresso: a placa de interface e a placa de pré-amplificação.

A placa de interface assegura a comunicação com o computador através da porta de comunicação paralela, através da qual recebe os sinais de comando da câmara gerados pelo programa de controlo e envia o resultado da digitalização do sinal vídeo proveniente da câmara. Os sinais de controlo ("clocks"), após filtragem, são enviados para a placa de pré-amplificação, juntamente com as tensões de alimentação necessárias. O sinal vídeo proveniente da câmara é digitalizado no conversor analógico-digital e os bits resultantes são preparados para o envio ao computador.

A placa de pré-amplificação efectua a tradução eléctrica dos sinais de "clock", provenientes da placa de interface, em sinais com níveis correctos para ataque do "chip" detector. Recebe, ainda, o sinal vídeo do detector e amplifica-o até ao nível conveniente para digitalização.

A fonte de alimentação assegura o fornecimento das tensões contínuas de alimentação necessárias ao funcionamento do sistema electrónico e da bomba que provoca a circulação do fluído refrigerante. Produz também uma tensão regulável para alimentação do módulo de Peltier.

Finalmente, o circuito fechado de refrigeração é constituído pela bomba responsável pela circulação do fluído refrigerante através do corpo da câmara e de uma serpentina de cobre, mergulhada num contentor de água, para realizar a troca térmica.

4.1.2. O Detector CCD TC245:

O detector CCD Texas Instruments TC245 apresenta-se como um "chip" de 20 contactos externos, conforme esquema da figura 4.2, na qual também se encontra especificado o respectivo "pin-out". Consiste num dispositivo detector com 786(H) x 488(V) fotoelementos organizados em matriz "frame transfer", ou seja, encontra-se dividido em duas áreas idênticas de 242 linhas cada: a área de imagem, fotossensível, e a área de memória que é protegida da radiação incidente por uma máscara de alumínio opaco para prevenir a corrupção da imagem adquirida por radiação luminosa durante o processo de transferência e leitura. Após o tempo de integração, toda a carga gerada nos fotoelementos da área de imagem é transferida

para a área de memória a um ritmo de 40 μs / linha, sendo a transferência completada em $242 \times 40 \mu\text{s} = 9860 \mu\text{s} \approx 10 \text{ ms}$.

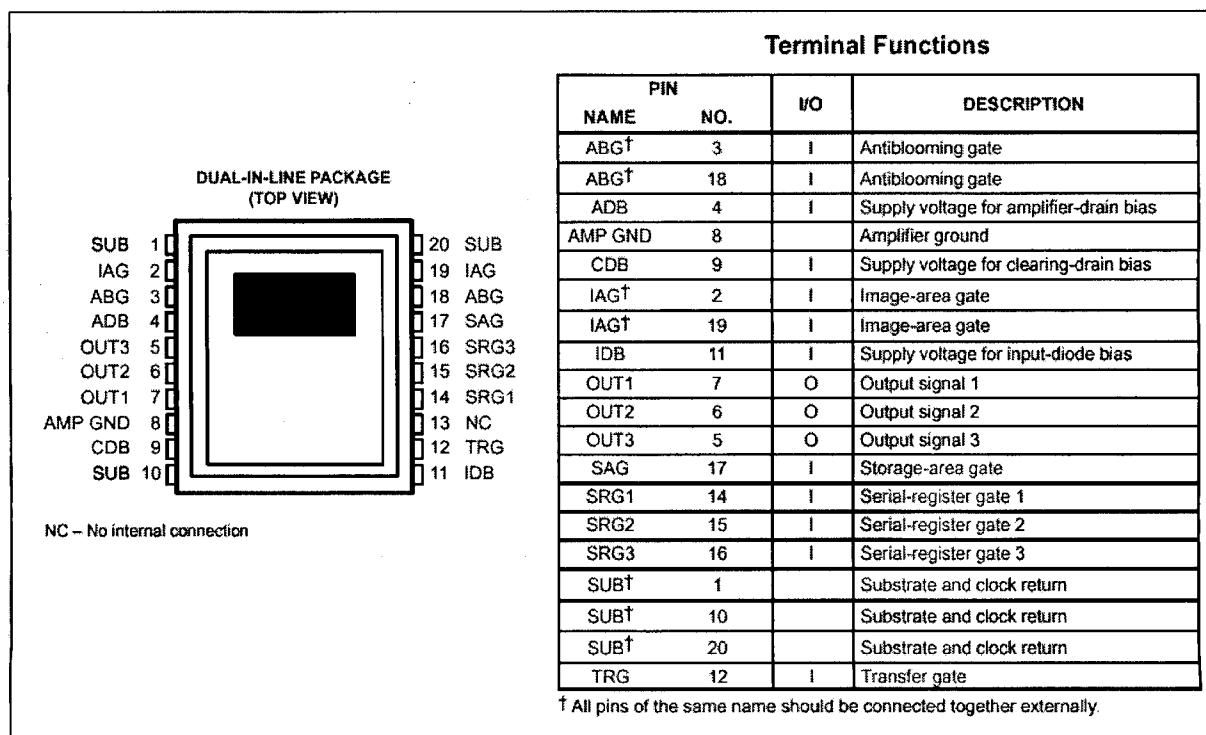


Figura 4.2 – Disposição de terminais e respectivo “pin-out” do “chip” detector CCD Texas Instruments TC245, utilizado no projecto. [Ref. 26].

Em cada linha da área de imagem existem 29 pixels também cobertos por máscara opaca de modo a serem usados como referência de “dark current”.

Cada fotoelemento é protegido contra os efeitos da saturação por “anti-blooming gate” que quando activada provoca a recombinação do excesso de carga com cargas de sinal contrário no substrato. Entre as áreas de imagem e de memória existem duas linhas opacas com o objectivo de prevenir a fuga de cargas da zona de imagem para a de memória, por aquela se manter exposta à luz durante o processo de leitura.

O sensor foi desenhado para operar em modo TV entrelaçado, isto é, desloca electronicamente os fotoelementos em campos alternados por metade de uma linha vertical durante o período de integração de carga, o que efectivamente aumenta a resolução vertical e minimiza o efeito de “aliasing” típico de uma amostragem espacial por elementos rectangulares. Contudo, também pode ser operado em modo não-entrelaçado, como uma matriz de 755(H) x 242(V) pixels activos, o que reduz a “dark current”, modo que será utilizado na presente aplicação.

Embora o detector em questão seja um sensor monocromático, pertence a uma família de desenvolvimento de sensores policromáticos, estando preparado para receber, como opção, uma máscara de cor sobre a estrutura semicondutora (como por exemplo o detector TC244 da mesma família). Por esse motivo, a leitura pode ser realizada em três registros horizontais, cada um recebendo as cargas de uma de três colunas contíguas, permitindo maior velocidade de leitura, o que se revela importante em aplicações vídeo. Contudo na aplicação que se pretende implementar, a velocidade de leitura não é prioridade, pelo que se utiliza apenas um registo horizontal, (e correspondente andar de saída e pré-amplificador), evitando erros fotométricos e imagens com bandas, resultantes de ganhos não perfeitamente idênticos dos três pré-amplificadores.

Os aspectos referidos nos parágrafos anteriores podem ser visualizados na figura 4.3, onde se apresentam os diagramas de blocos funcional e de topologia do sensor TC245.

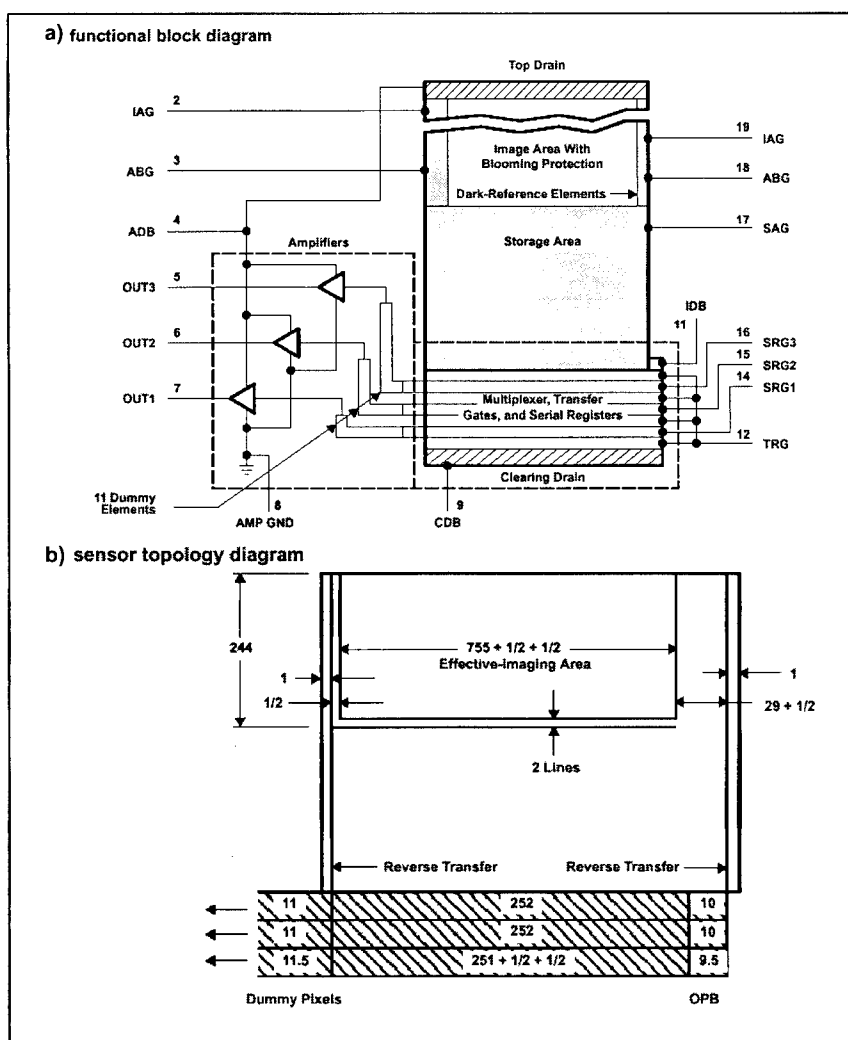


Figura 4.3 – Diagrama de blocos funcional (a) e diagrama de topologia (b) do sensor TC245. [Ref. 26].

A análise da figura 4.3 permite ainda verificar a existência de um circuito “multiplexer” na interface entre a área de memória e os três registos de deslocamento horizontal, permitindo dividir a última linha da área de memória (756 pixels activos) pelos três registos de 252 pixels cada (+10 pixels de referência de “dark” à direita e +11 pixels mudos para efeito de isolamento entre leituras à esquerda). Abaixo dos três registos de deslocamento horizontal existe, ainda, um eléctrodo (“clearing drain”) cuja função será drenar cargas resultantes dos procedimentos de limpeza do detector CCD, a realizar antes de uma integração de imagem.

“**Binning**”- Cada fotoelemento do detector CCD TC245 tem por dimensões 8,5 μm (H) x 19,7 μm (V). Embora em aplicações de vídeo sejam admissíveis imagens com resoluções diferentes segundo os eixos horizontal e vertical, podendo-se sempre aumentar a resolução vertical por meio de entrelaçamento, tal não é desejável em aplicações astronómicas. Recorre-se, então, à técnica de “binning” (conforme referido anteriormente na secção 2.6.3), combinando fotoelementos adjacentes em grupos de dois ou três, obtendo-se “superpixels” de dimensões 17 μm (H) x 19,7 μm (V) ou 25,5 μm (H) x 19,7 μm (V), respectivamente, e matrizes de

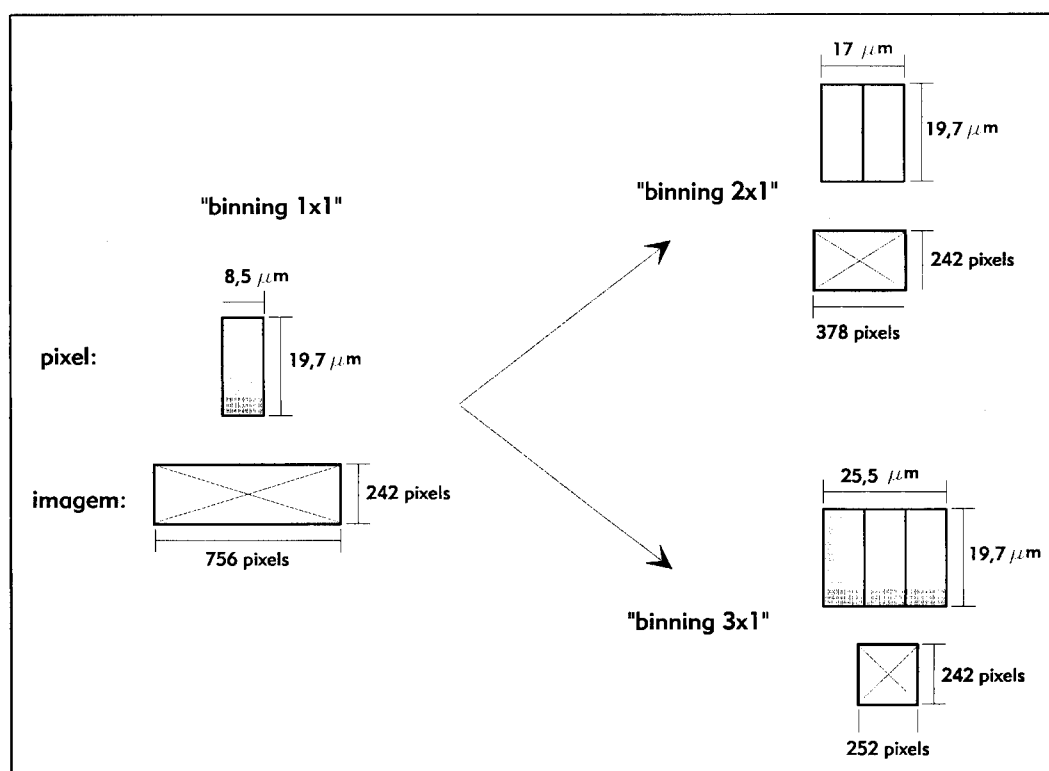


Figura 4.4 – Formas de “binning” usualmente aplicadas no detector TC245 de modo a obter pixels de formato aproximadamente quadrangular.

imagem de 378 (H) x 242 (V) ou 252 (H) x 242 (V), conforme se pretende ilustrar na figura 4.4.

Além de formar pixels de geometria quadrangular, a técnica de “binning” permite melhorar a relação sinal-ruído e a sensibilidade à radiação, embora à custa de pior resolução espacial (conforme já referido na secção 3.2.4). De modo a tornar a operação do detector mais versátil e adaptável a diferentes tipos de observação, convém que exista a possibilidade de modificar, conforme as necessidades, a configuração de “binning”, a partir do programa de controlo da câmara. Tal é possível de três modos distintos:

- “binning” interno, que consiste em transferir a penúltima linha da área de memória sobre a última, antes de esta ser transferida para o registo horizontal, obrigando os pacotes de cargas existentes em dois pixels adjacentes da mesma coluna a adicionarem-se, após o que a linha composta será transferida para o registo horizontal para leitura, permitindo “binning” vertical; o detector TC245 permite ainda “binning” horizontal, transferindo três colunas da mesma linha sobre o mesmo registo horizontal, por inibição do funcionamento do “multiplexer”; este modo de “binning” permite leituras mais rápidas, embora a combinação de vários pacotes de carga num só pixel possa saturá-lo;
- “binning” externo, que consiste em adicionar os dados, resultantes da digitalização de vários pixels, por software no computador, o que permite maior variação dinâmica que o modo interno, em virtude dos pacotes de carga não serem adicionados em poços de potencial; devido à existência de três registos horizontais, cada um com um terço da capacidade de uma linha, e ser desejável utilizar apenas um andar de saída pelos motivos anteriormente referidos, este é o processo habitualmente utilizado nesta câmara; consiste na transferência dos fotoelementos das colunas 1, 4, 7,... de uma linha para um registo horizontal e sua consequente leitura, repetindo-se o processo para as colunas 2, 5, 8,... no mesmo registo, e finalmente para as colunas 3, 6, 9,... ; após a digitalização da informação, esta é ordenada e combinada no computador, sendo o valor de cada pixel escrito no local próprio da matriz de imagem de 252 x 242; contudo, de modo idêntico, também é possível combinar a informação em 378 pares de pixels, obtendo-se uma matriz de 378 x 242;

- “binning” composto, que se obtém pela sobreposição dos dois modos anteriores, permitindo pixels de maior área e portanto maior sensibilidade, o que se torna útil na pesquisa de alvos ténues; produz “binning” de 2 x 6 e matrizes de imagem de 126 x 121, que são designadas por “quarter frames” e utilizadas no modo de operação “finding mode”, disponibilizado pelo software de controlo da câmara.

Detecção de carga – Conforme discutido na secção 2.3, a detecção de carga no andar de saída de um detector CCD processa-se num nó de detecção, “floating diode”, que funcionando como um condensador, é previamente carregado com uma tensão de referência. Quando o pacote de cargas é admitido, a carga que transporta, Q , provoca uma variação de tensão no nó de valor $\Delta U = Q/C$, (sendo C a capacidade equivalente do nó), que amplificada constitui o sinal de saída. Contudo este processo é afectado de erro (“Reset Noise”) em virtude da comutação da tensão de referência provocar variações aleatórias entre leituras. De modo a eliminar esta fonte de ruído, a detecção de carga no detector TC245 é realizada num andar de saída mais elaborado, esquematizado na figura 4.5, que implementa um método

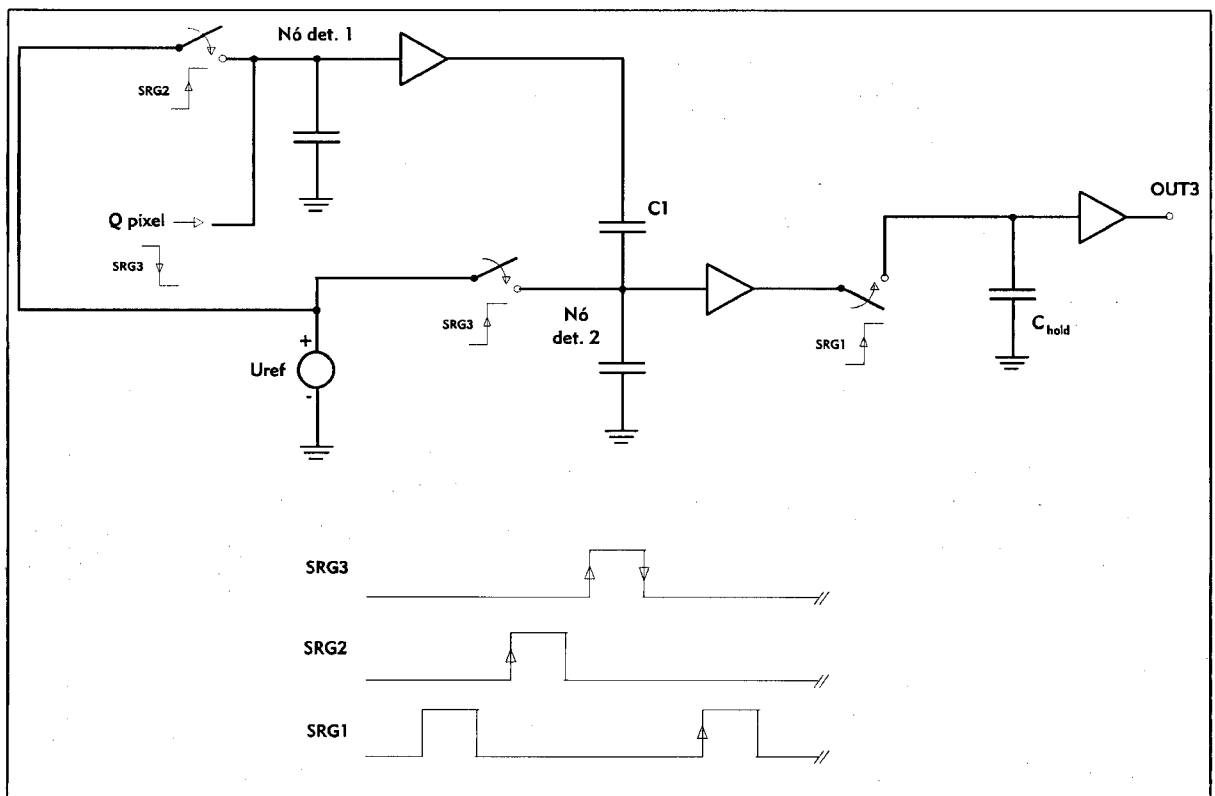


Figura 4.5 – Esquema funcional do andar de saída do detector TC245, permitindo analisar o processo de detecção de carga por “Correlated Double Sampling” e diagrama temporal dos “clocks” SRG1, SRG2 e SRG3 que comandam o processo.

de detecção designado por dupla amostragem correlacionada (“Correlated Double Sampling”). O processo ilustrado na figura, diz respeito ao registo de deslocamento horizontal n.º 3, é comandado pelos sinais de “clock” SRG3, SRG2 e SRG1, consistindo no seguinte:

Quando SRG2 se encontra no nível alto, o nó de detecção 1 fica conectado à tensão de referência U_{ref} , mas ao ser comutado para o nível baixo impõe no nó uma tensão de “Reset” aleatória, U_{Reset} , (o que origina “Reset Noise”), ficando aquele ao potencial $U_{ref} + U_{Reset}$;

Quando SRG3 for comutado para o nível alto, o nó de detecção 2 é por sua vez conectado à referência, apresentando o Condensador C_1 num dos seus terminais o potencial U_{ref} e no outro o potencial do nó 1, ou seja uma tensão U_{Reset} entre terminais, que permanecerá armazenada;

Quando SRG3 regressar ao nível baixo, o nó 2 é desligado da referência, ficando o terminal inferior de C_1 flutuante (o amplificador-tampão – “buffer” – ligado ao nó impossibilita a sua descarga), e no nó 1 é recebida a carga Q resultante da transferência do último pixel do registo horizontal, tomando o seu potencial o valor de $U_{ref} + U_{Reset} - Q/C$; a partir deste instante, o potencial do nó 2 passará a ser o potencial do nó 1 menos a queda de tensão em C_1 , ou seja, $U_{ref} - Q/C$, valor correcto de leitura, sem o ruído próprio do carácter aleatório de U_{Reset} ;

Quando SRG1 comutar ao nível alto, a tensão de leitura será colocada na saída OUT3, carregando o Condensador C_{hold} que obrigará a manter o valor da saída constante, até ser completada nova sequência.

Diagramas temporais – O mecanismo de transferência de carga é realizado, no detector TC245, por um processo ligeiramente diferente dos discutidos na secção 2.2. Designa-se por fase virtual e baseia-se no desenho especial da cada fotoelemento de modo a criar uma barreira e um poço de potencial virtuais, conforme se ilustra na figura 4.6 a), proporcionando, segundo o fabricante, maior sensibilidade à radiação azul, baixa “dark current” e grande uniformidade na resposta espectral, permitindo o comando do processo de transferência por apenas um sinal de clock – fase simples. De acordo com a figura 4.6 b), a transferência por fase simples consiste em empurrar o pacote de cargas do poço de potencial sob a “gate” (“clocked well”) para o poço virtual, no flanco ascendente do sinal de “clock”, sendo posteriormente transferido para o fotoelemento vizinho, no flanco descendente.

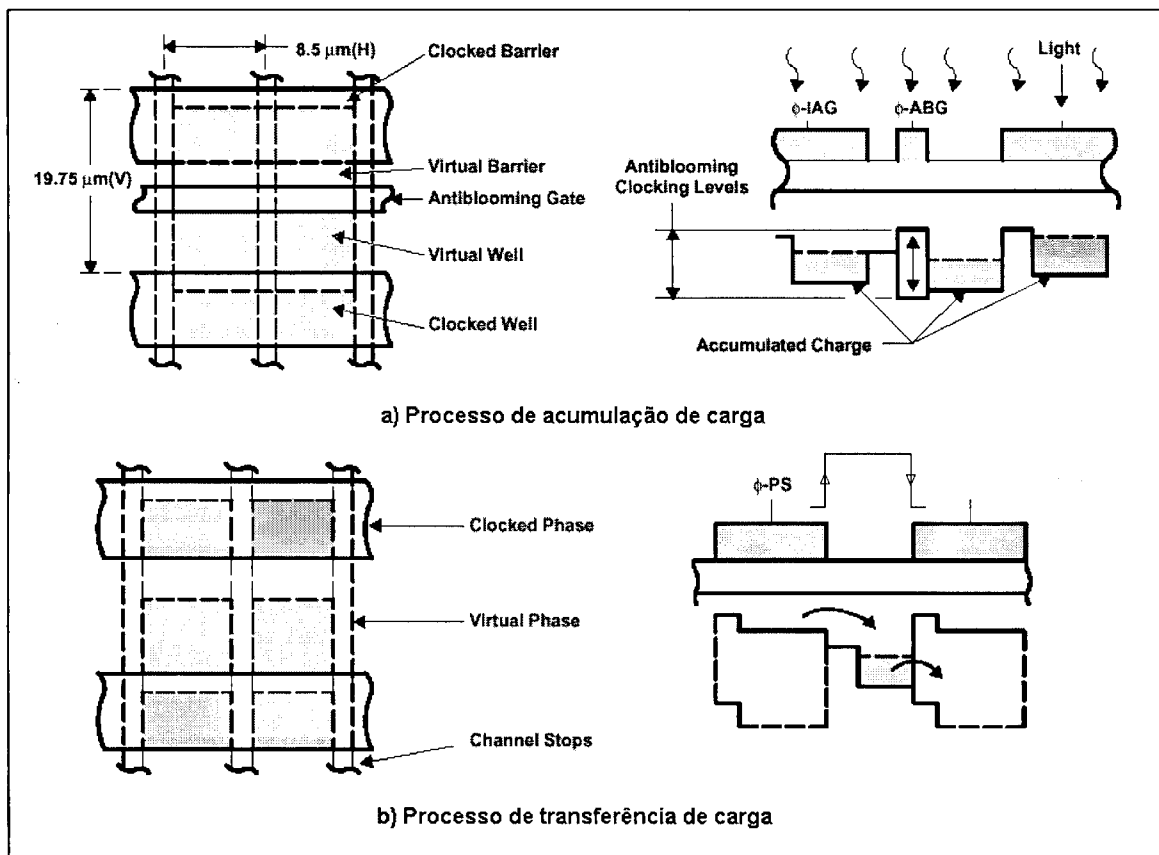


Figura 4.6 – Processos de acumulação de carga (a) e de transferência de carga (b) no detector CCD TC245. Adaptado de [Ref. 26].

O controlo da câmara é assegurado por sinais de comando, “clocks”, gerados pelo programa de controlo. É, portanto, necessário conhecer com precisão a sequência de sinais de comando necessários ao controlo das várias operações executadas pelo detector CCD durante o processo de aquisição de imagem, que é composto por quatro fases:

- 1) Limpeza das cargas existentes na área de imagem por transferência de todas as linhas, através da área de memória e registos horizontais, até ao eléctrodo de drenagem, “clearing drain”;
- 2) Geração de cargas nos fotoelementos por efeito fotoeléctrico – integração da imagem;
- 3) Transferência de cargas da área de imagem para a área de memória, linha a linha;
- 4) Transferência linha a linha da área de memória para o registo horizontal, leitura por deslocamento série e digitalização.

Na figura 4.7 apresentam-se os diagramas temporais dos sinais de “clock” necessários à execução das três primeiras fases. Imediatamente antes da

transferência da área de imagem para a de memória, esta é limpa de cargas, para melhor precisão de leitura.

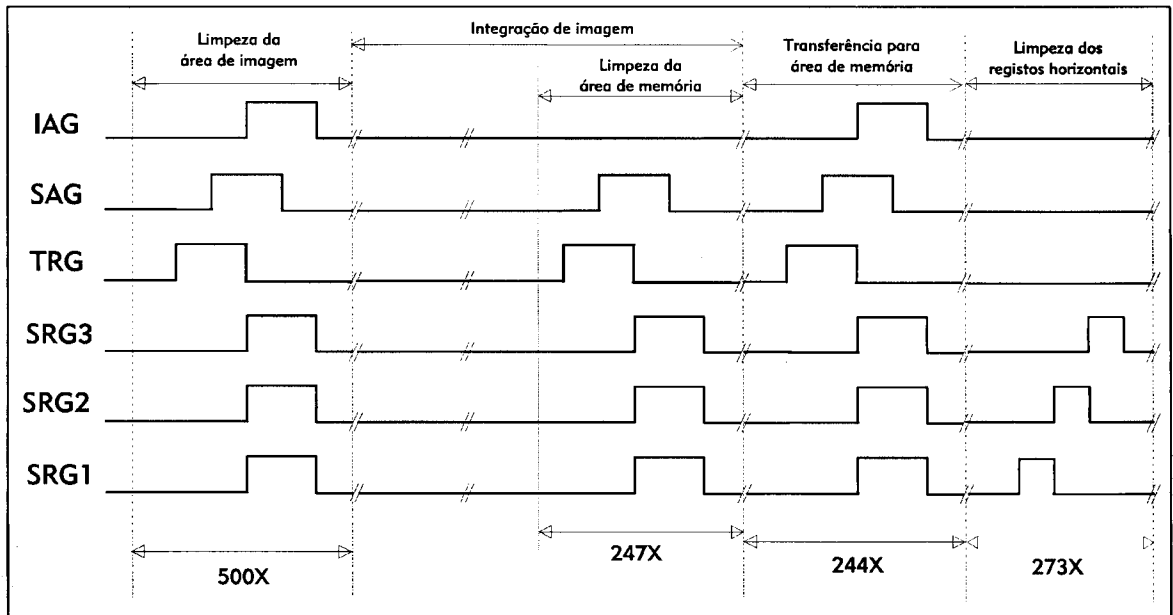


Figura 4.7 – Diagramas temporais dos “clocks” nas fases de limpeza da área de imagem, integração de imagem e transferência para a área de memória.

Na fase seguinte, e durante a transferência das linhas da área de memória para o registo horizontal de leitura, são implementadas as combinações de pixels desejadas (“binning”), o que se reflecte na configuração dos diagramas temporais, conforme explicitado na figura 4.8.

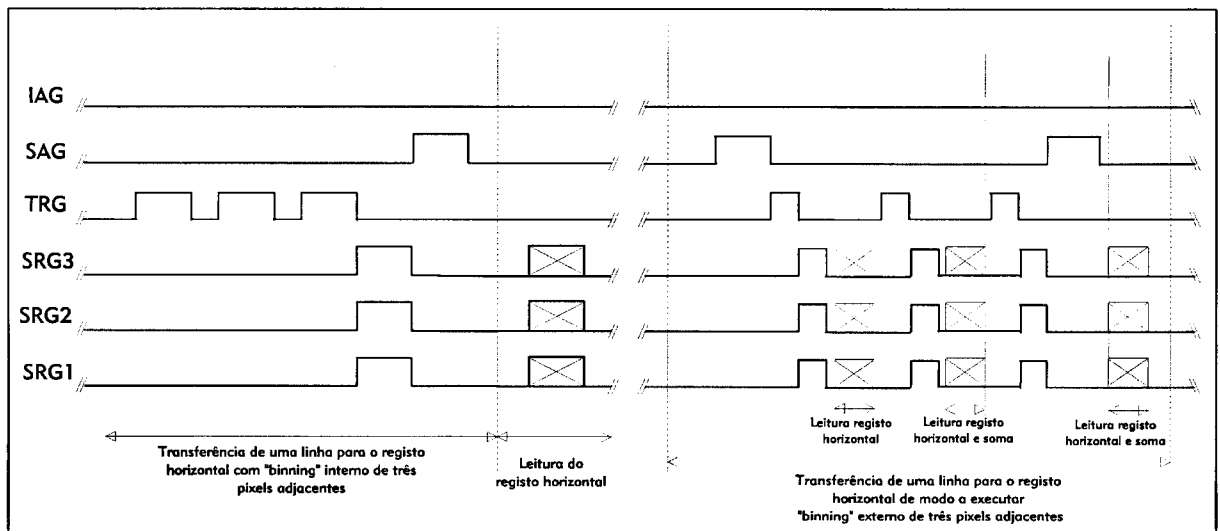


Figura 4.8 - Diagramas temporais dos “clocks” na fase de transferência da área de memória para o registo de deslocamento série horizontal, com implementação de “binning” interno e externo de três pixels adjacentes.

Após a transferência de cada linha para o registo horizontal (ou parte da linha no caso de “binning” externo) procede-se ao deslocamento série das cargas no registo e conseqüente leitura no andar de saída, seguida da digitalização do sinal obtido pelo conversor analógico-digital. O sincronismo deste com o processo de leitura é assegurado pelo sinal ADC, enviado pelo programa de controlo, assim como os sinais A0 e A1 necessários para controlo do “multiplexer” de transmissão da palavra digital obtida para o computador. O respectivo diagrama temporal está representado na figura 4.9.

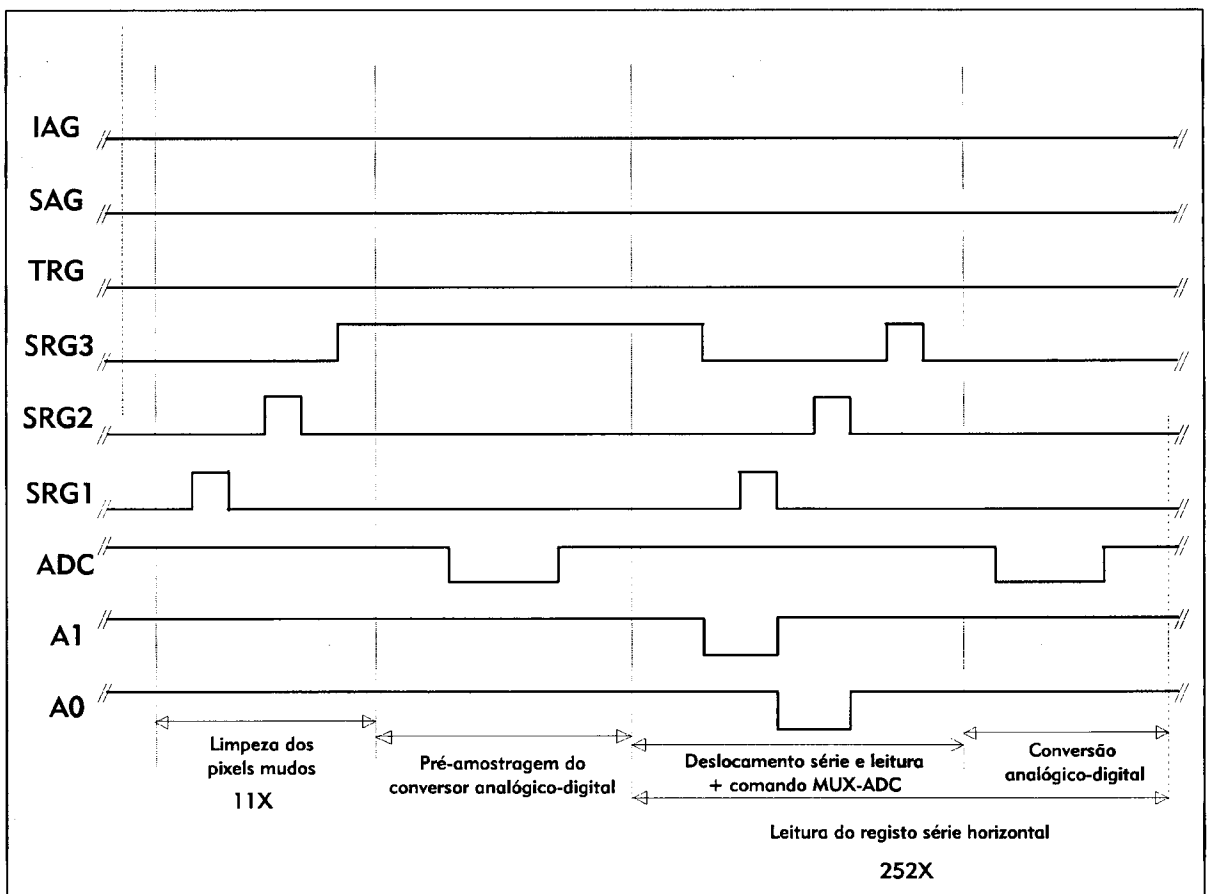


Figura 4.9 - Diagramas temporais dos “clocks” na fase de leitura e digitalização de uma linha do registo de deslocamento série horizontal.

4.1.3. Fonte de Alimentação:

A fonte de alimentação fornece as tensões contínuas necessárias ao funcionamento dos diversos sistemas constituintes da câmara conforme representado na figura 4.1.

Em virtude de não serem incluídos no kit importado, todos os componentes electrónicos tiveram de ser adquiridos em casas comerciais da especialidade. Foi também necessário desenhar e produzir a caixa de alumínio na qual se alojou a fonte, prevendo nos respectivos painéis as necessárias furações para instalação dos componentes acessíveis do exterior e fichas de ligações.

Por outro lado, o projecto de circuito eléctrico, proposto no documento de apoio [Ref. 2], teve que ser modificado para funcionar com a tensão de rede utilizada em Portugal (220 Volts AC) e de acordo com os componentes electrónicos disponíveis no mercado.

Por estes motivos o circuito eléctrico foi redesenhado de modo a satisfazer as seguintes especificações eléctricas de funcionamento requeridas:

- 1) Fonte para alimentação dos sistemas electrónicos da câmara, disponibilizando tensões de +15, 0, -15 Volts DC e uma intensidade máxima de corrente de 0,5 Ampéres, filtrada, mas sem necessidade de regulação, que será implementada na placa de interface;
- 2) Fonte de tensão para alimentação da bomba do circuito fechado do fluído de refrigeração capaz de fornecer 5 VDC à intensidade de 1 Ampére, filtrada;
- 3) Fonte para alimentação do Módulo de Peltier, permitindo obter uma tensão regulada e ajustável até cerca de 7 VDC e capaz de debitar uma intensidade de corrente máxima de 5 Ampéres.

O circuito projectado e montado obedece ao esquema eléctrico representado na figura 4.10, sendo os componentes utilizados descritos na tabela 4.1.

Note-se que no transformador T2 só se utiliza metade do enrolamento, podendo ser substituído com vantagem por um transformador de enrolamento simples de 220V / 6 V @ 1 A. Contudo, em virtude deste não estar disponível no mercado na altura da aquisição, optou-se pela solução descrita.

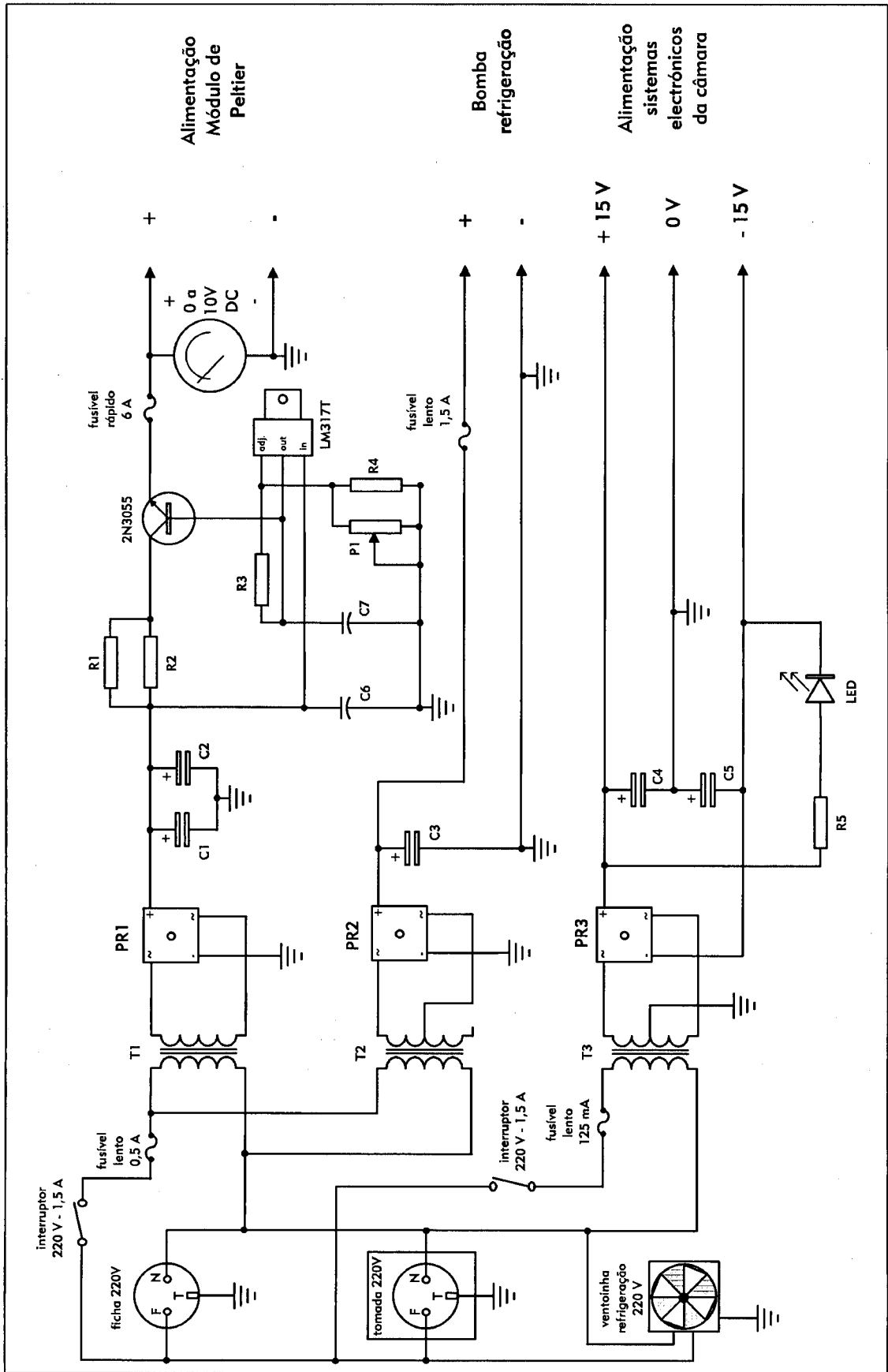


Figura 4.10 – Esquema eléctrico da fonte de alimentação.

Referência	Valor / Características	Descrição / Observações
T1	220 V / 12 V @ 5 A	Transformador
T2	220 V / 2 x 6 V @ 1 A	Transformador com tomada central
T3	220 V / 2 x 12 V @ 1 A	Transformador com tomada central
PR1	5 A	Ponte rectificadora, montada em dissipador
PR2, PR3	1 A	Ponte rectificadora
R1, R2	1 Ω , 10 W	Resistências de potência
R3	100 Ω , 1/8 W	Resistência de carvão
R4	1,5 K Ω , 1/8 W	Resistência de carvão
R5	2 K Ω , 1/8 W	Resistência de carvão
P1	1 K Ω	Potenciômetro para montagem em painel
C1, C2, C4, C5	4700 μ F, 35 V	Condensador electrolítico
C3	1000 μ F, 35 V	Condensador electrolítico
C6, C7	0,1 μ F, 160 V	Condensador poliéster
2N3055	-	Transistor NPN potência, montado em dissipador
LM317T	-	Circuito integrado regulador, montado com dissipador
-	0 a 10 V DC	Voltímetro de painel

Tabela 4.1 – Lista de componentes utilizados na montagem da fonte de alimentação.

De modo a facilitar a sustentação e interligação dos vários componentes, utilizaram-se placas de ebonite pré-furadas em matriz e com pistas de cobre dispostas em coluna (“Veroboard”), que permitem uma montagem mecânica estável para os componentes, facilidade de execução das necessárias soldaduras, fiabilidade e rapidez de montagem.

Devido à elevada potência dissipada pela ponte rectificadora PR1 e pelo transistor 2N3055, estes componentes foram montados sobre um dissipador de alumínio de dimensões 114x100 mm, assegurando-se o contacto térmico da ponte rectificadora por meio de massa térmica própria. Em virtude do colector do transistor se encontrar curto-circuitado com o invólucro metálico exterior, este teve de ser montado sobre uma placa de mica adequada, havendo o cuidado de garantir o isolamento eléctrico dos parafusos de fixação por peças plásticas próprias.

Sobre o circuito integrado regulador LM317T foi montado um pequeno dissipador, específico para o tipo de invólucro do dispositivo, utilizando-se também massa térmica para garantir boa conductividade do calor a dissipar. Os terminais do componente podem ser identificados colocando-o deitado, em posição análoga à do esquema da figura 4.10.

Os condensadores electrolíticos, sendo dispositivos polarizados, têm de ser montados no sentido correcto, sendo identificado o terminal positivo na sua caixa exterior.

O valor da resistência R5 depende do LED utilizado e pode ser ajustado de modo a obter-se a intensidade de emissão desejada. Como este só funciona num sentido, convém testar a polaridade antes de executar a soldadura.

Houve ainda o cuidado, na montagem do potenciómetro P1, de garantir que o aumento de tensão na saída da fonte de alimentação do módulo de Peltier se obtém ao rodar o respectivo eixo no sentido retrógrado.

A montagem dos restantes componentes não oferece dificuldades de assinalar. Para a instalação do circuito utilizou-se uma caixa de alumínio com as dimensões de 40x28 cm e 11 cm de altura, sendo a disposição final dos componentes reproduzida na figura 4.11.

Os painéis frontal e de fundo da caixa utilizada na montagem tiveram de ser furados de modo a permitirem a fixação dos vários dispositivos necessários, conforme os esquemas de furações exibidos na figura 4.12.

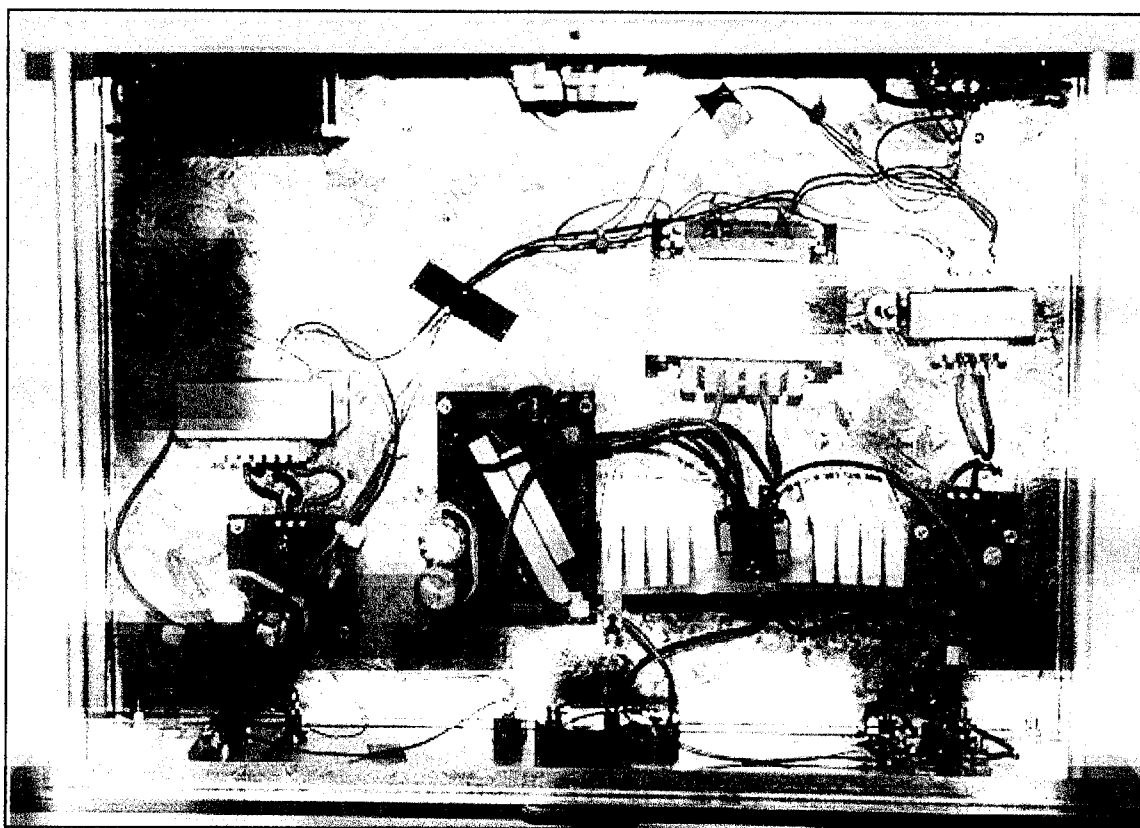


Figura 4.11 – Disposição de montagem dos vários componentes.

Os furos circulares de menores diâmetros foram realizados por engenho de furar usual, enquanto os restantes foram executados, sob pedido, em oficina de serralharia convenientemente apetrechada para o efeito. Convém notar que o alumínio de que são constituídos os painéis revela-se um material muito fácil de trabalhar, permitindo com facilidade ajustes e aperfeiçoamento dos cortes por limagem.

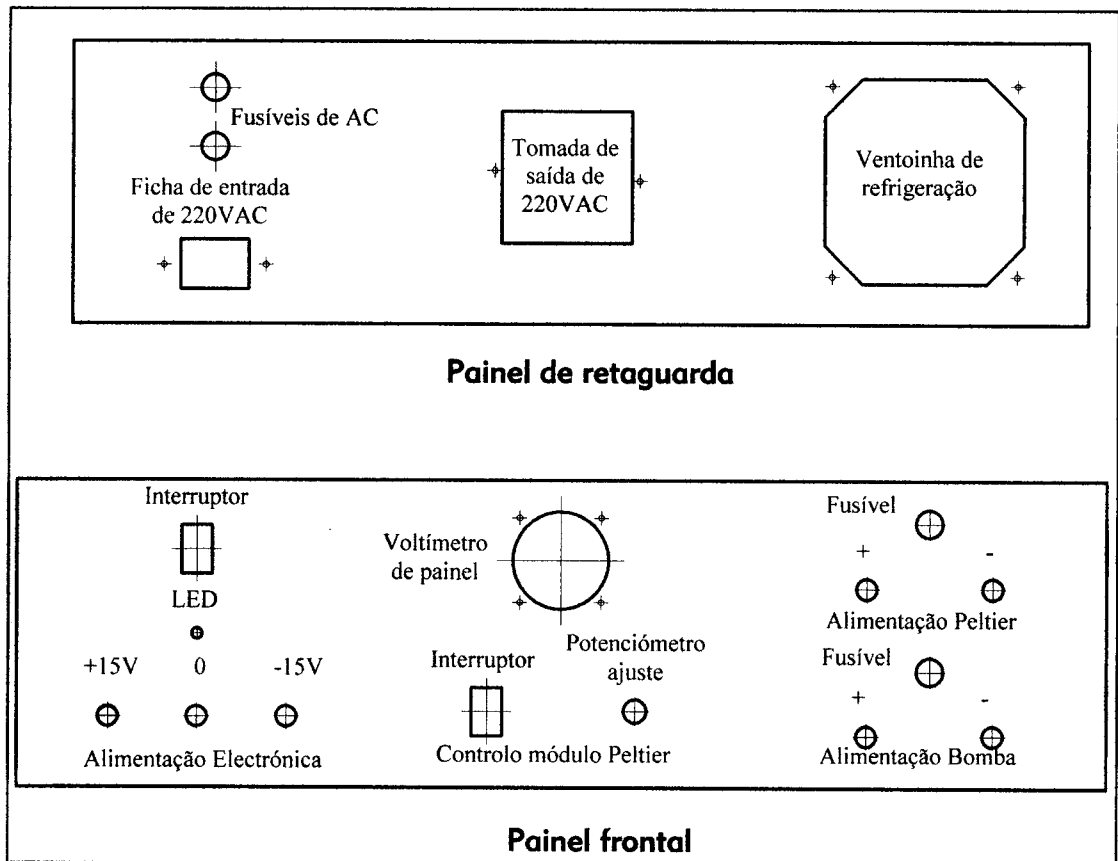


Figura 4.11 - Esquemas de furações dos painéis de retaguarda e frontal da caixa metálica que encerra a fonte de alimentação.

Previram-se, ainda, furos de ventilação colocados no painel lateral oposto ao ventilador, de modo ao circuito de ar forçado passar pelo dissipador instalado.

As fotografias reproduzidas nas figuras 4.13 a 4.15 mostram o produto final obtido.

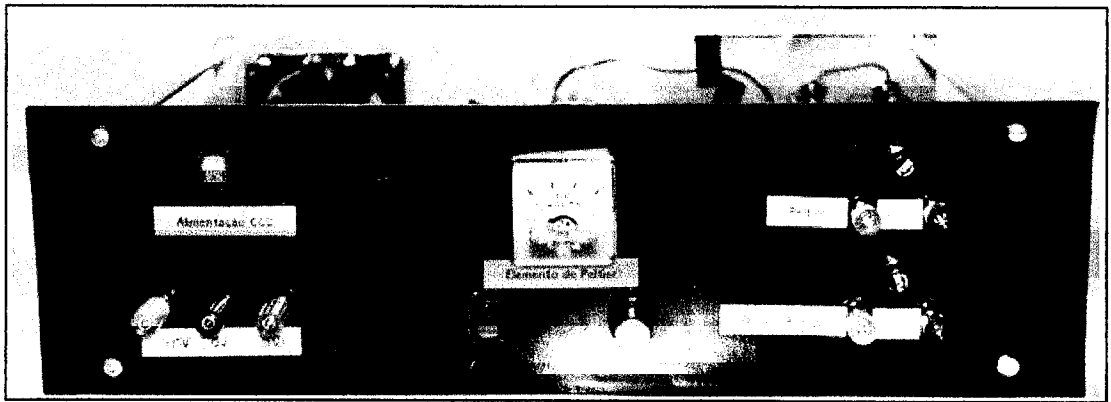


Figura 4.13 – Fonte de alimentação, vista de frente.

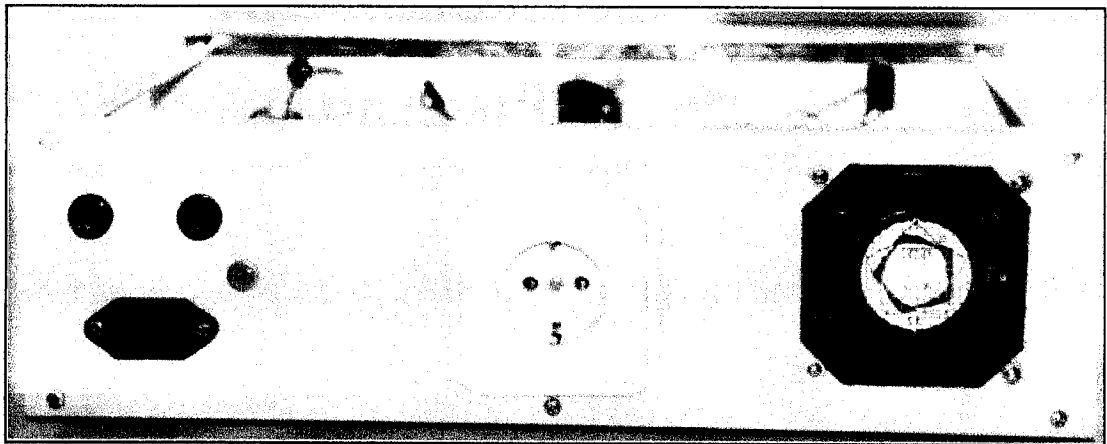


Figura 4.14 - Fonte de alimentação, vista de trás.

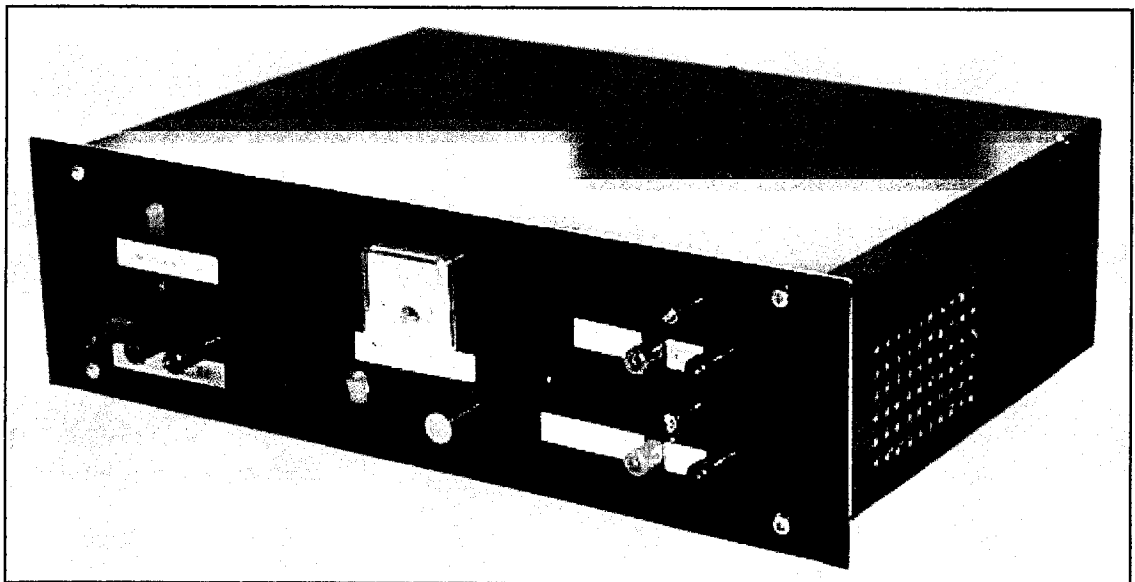


Figura 4.15 - Fonte de alimentação, vista geral.

4.1.4. Electrónica da Câmara:

O sistema electrónico da câmara é constituído por duas placas de circuito impresso distintas: a placa de interface e a placa de pré-amplificação.

A primeira tem por função assegurar a comunicação com o computador, recebendo e filtrando os sinais de clock que comandam a câmara. Simultaneamente digitaliza o sinal vídeo proveniente do detector e prepara a transmissão do sinal digital resultante para o computador. Possui, ainda, uma secção responsável por, a partir dos $\pm 15V$ recebidos da fonte da alimentação, gerar e regular os níveis de tensão contínua necessários à alimentação dos diversos circuitos integrados existentes nas placas e do "chip" detector CCD.

A placa de pré-amplificação prepara o sinais de "clock" recebidos da placa de interface para o ataque directo ao "chip" detector e amplifica o sinal vídeo que recebe deste.

4.1.4.1. Placa de interface:

Para melhor compreender o funcionamento desta placa convém conhecer em pormenor o protocolo de comunicação utilizado por uma porta paralela, usualmente destinada à troca de informação entre um computador e uma impressora, uma vez que é utilizada nesta montagem para assegurar a transmissão de sinais entre o computador e a câmara.

Os computadores possuem geralmente no painel traseiro, uma ficha de acesso à porta paralela, de tipo D com 25 pinos, conforme se ilustra na figura 4.16, estando o respectivo "pin-out" (correspondência entre terminais e sinais eléctricos) especificado na tabela 4.2.

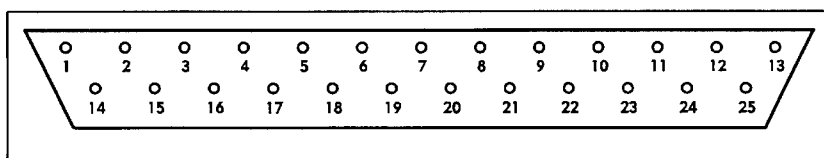


Figura 4.16 – Ficha D de 25 pinos de acesso à porta paralela de um computador.

Terminal n.º	Sinal eléctrico	Direcção	Função
1	- Strobe	Saída	Indica dados válidos disponíveis
2	Bit de dados 0	Saída	
3	Bit de dados 1	Saída	
4	Bit de dados 2	Saída	
5	Bit de dados 3	Saída	
6	Bit de dados 4	Saída	
7	Bit de dados 5	Saída	
8	Bit de dados 6	Saída	
9	Bit de dados 7	Saída	
10	- Acknowledge	Entrada	Indica dados recebidos e pronto p/ seguintes
11	Busy	Entrada	Dispositivo ocupado – não pode receber dados
12	Paper End	Entrada	Sinaliza dispositivo sem papel p/ impressão
13	Select	Entrada	Dispositivo seleccionado
14	- Auto Feed	Saída	Linha seguinte automática após fim de linha
15	- Error	Entrada	Sinalização de erro
16	- Initialize Printer	Saída	Inicialização do dispositivo (“Reset”)
17	- Select Input	Entrada	Dispositivo pronto para receber dados
18 - 25	Ground	-	Tensão de referência (0V) - retorno

Notas: A direcção é relativa ao computador.
Os sinais eléctricos precedidos de “ - ” são activados no nível baixo.

Tabela 4.2 – Correspondência entre os terminais da ficha D e os sinais eléctricos numa porta paralela standard.

A comunicação entre o “bus” interno do computador e a ficha D de saída da porta paralela, é estabelecida por três registos internos de 8 bits, ou portos de entrada/saída (“I/O ports”): Porto de dados, Porto de Estado e Porto de Controlo, em que o segundo é destinado a operações de entrada (leitura) e os restantes a operações de saída (escrita). Qualquer operação de transmissão de dados é executada por uma sucessão de operações de escrita e de leitura naqueles registos, cujo endereço base de acesso (endereço hexadecimal do primeiro porto) está reservado pela “BIOS” do sistema, tomando usualmente um dos seguintes valores:

278 H; 378 H; 3BC H.

O programa de controlo apenas terá de dar ordens para operações de escrita e leitura nos registos para comandar a câmara e receber os dados da digitalização da imagem. A tabela 4.3 especifica a correspondência entre os diversos bits dos registos, os sinais que gerem no funcionamento como porta paralela standard e a sua utilização para comunicação com a câmara neste projecto.

Bit n.º	Porto de Dados (278 H)		Porto de Estado (279 H)		Porto de Controlo (27A H)	
	Porta paral.	Câmara	Porta paral.	Câmara	Porta paral.	Câmara
0	Bit dados 0	SRG1 clock	-	-	-Strobe	ADC conv.
1	Bit dados 1	SRG2 clock	-	-	-Auto Feed	-
2	Bit dados 2	SRG3 clock	-	-	-Initialize	-
3	Bit dados 3	TRG clock	-Error	-	-Select	-
4	Bit dados 4	MUX U4	Select In	Nibble bit 0	-	-
5	Bit dados 5	MUX U3	Paper End	Nibble bit 1	-	-
6	Bit dados 6	IAG clock	-Acknowledge	Nibble bit 2	-	-
7	Bit dados 7	SAG clock	Busy	Nibble bit 3	-	-

Tabela 4.3 – Correspondência entre os portos de Entrada/Saída e os sinais manipulados em funcionamento como porta paralela standard e na comunicação com a câmara CCD.

De notar que, embora existam linhas de comunicação no sentido Computador – placa em número suficiente, no sentido oposto apenas estão disponíveis cinco linhas que são insuficientes para a transmissão do sinal digital de 12 bits oriundo do conversor analógico-digital. Recorre-se à multiplexagem desses 12 bits em três conjuntos de 4 bits (“nibbles”), sendo o processo comandado e sincronizado pelos sinais MUX U3 e MUX U4, conforme se discutirá adiante.

Conhecido o protocolo de comunicação entre o computador e a placa de interface, é possível compreender o seu desenho electrónico. Na figura 4.17 apresenta-se o diagrama de blocos funcional respectivo.

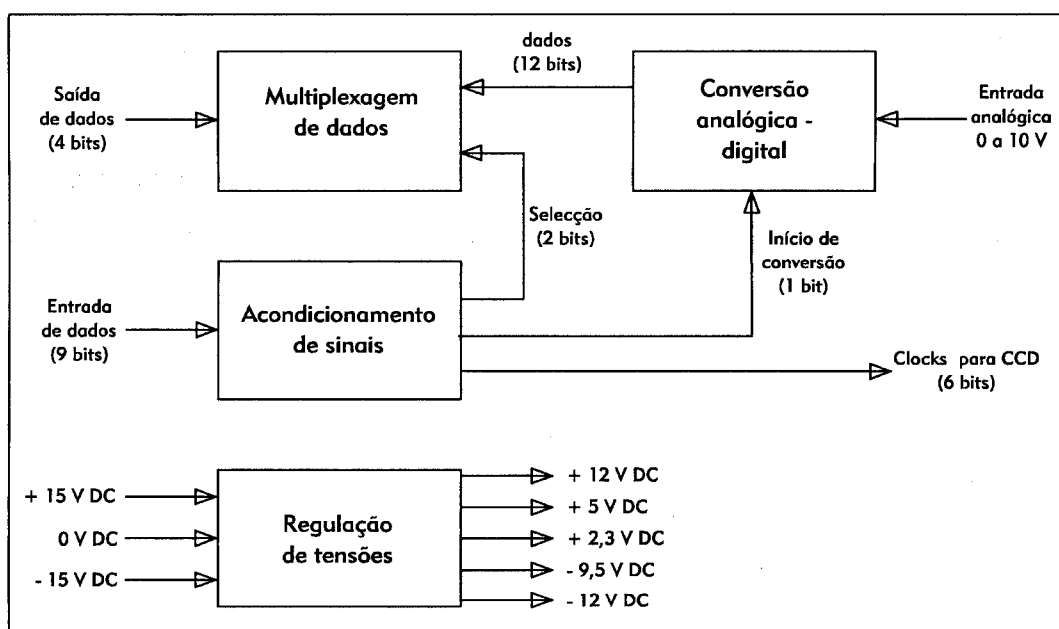


Figura 4.17 – Diagrama de blocos funcional da placa de interface.

De acordo com o diagrama, a placa apresenta duas secções distintas: uma responsável pela regulação dos níveis de tensão contínua necessários à alimentação dos vários dispositivos electrónicos existentes nas placas; a outra, constituída pelos restantes blocos, tem como função a manipulação dos sinais de entrada provenientes do computador e prepara o sinal digital de saída para transmissão.

A secção de regulação de tensão é constituída por um conjunto de circuitos integrados reguladores que recebendo os níveis de tensão não regulada da fonte de alimentação (± 15 V DC), os transforma nos seguintes níveis de tensão regulada, necessários ao funcionamento dos vários dispositivos existentes em ambas as placas, incluindo o detector CCD:

+12 V DC; +5 V DC; +2,3 V DC; -9,5 V DC; -12 V DC

O esquema eléctrico desta secção é mostrado na figura 4.18.

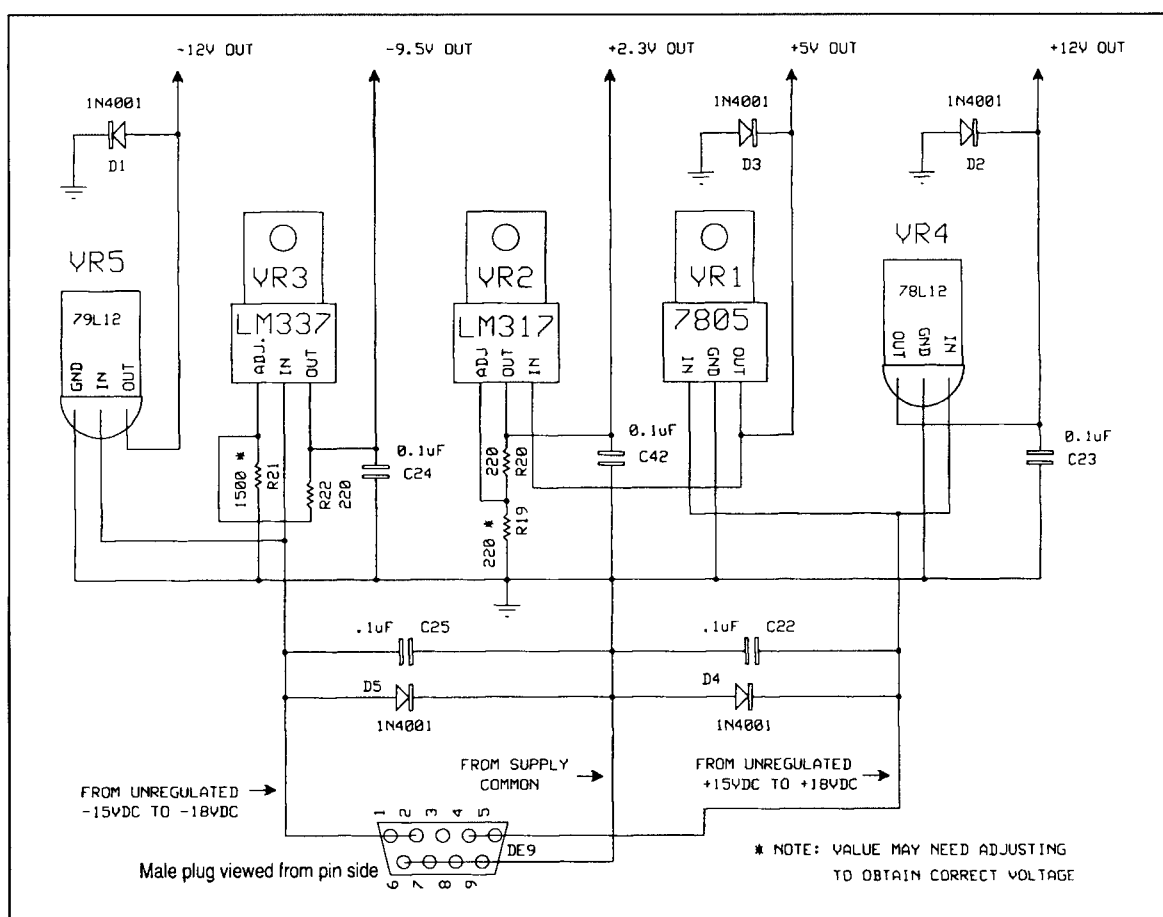


Figura 4.18 – Esquema eléctrico da secção de Regulação de tensões da placa de interface.

Note-se que a entrada dos níveis provenientes da fonte de alimentação é assegurada por uma ficha macho tipo D de 9 pinos.

A secção responsável pelos sinais de entrada e saída é constituída pelos restantes blocos funcionais definidos no diagrama da figura 4.17 e o seu esquema eléctrico encontra-se representado na figura 4.19.

A ligação entre a ficha da porta paralela do computador e a placa de interface é assegurada por um cabo de 25 condutores paralelos (“flat cable”) com o comprimento máximo de 4,5 metros. A imposição no máximo de comprimento do cabo deve-se à limitação dos efeitos de reflexão da transmissão de sinais digitais (efeito “ringing”), ocasionados pela rápida transição entre os níveis eléctricos desses sinais. Este problema é minimizado reduzindo o comprimento do cabo, de modo a que o tempo de transição entre níveis lógicos seja superior ao tempo de propagação de uma reflexão no cabo (≈ 60 ns em 4,5 metros), ou terminando a linha de transmissão com a correcta adaptação de impedâncias, o que diminui a reflexão do sinal. Tal é conseguido pelos circuitos RC nas entradas dos sinais ($R1\dots R9=100\Omega$ e $C1\dots C9=100\text{pF}$) obtendo-se uma impedância de entrada adaptada à das linhas de transmissão ($\approx 150\Omega$). Por outro lado, embora os condutores que transmitem os sinais no cabo estejam separados por condutores ligados à tensão de referência (Terra), o que lhes conferem alguma imunidade ao ruído, podem estar sujeitos a acoplamentos electromagnéticos entre si (“crosstalk”). Ainda, como acima referido, a transmissão dos sinais pelo cabo limita o tempo de transição entre níveis lógicos a 60 ns (“Slew rate”) e o detector CCD exige transições inferiores a 35 ns.

Os eventuais erros no comando do detector, induzidos pelos efeitos de “ringing” e “crosstalk” e a limitação de “Slew rate”, podem ser reduzidos ou mesmo eliminados, pela incorporação nas entradas da placa de interface dos circuitos integrados TTL 74LS14, inversores dotados de entradas com histerese⁽¹⁾ (“Schmidt-triggered”), que permitem retirar os sinais da linha de transmissão com as características pretendidas, ficando assim constituído o bloco de acondicionamento de sinais referido no diagrama funcional da figura 4.17.

Outro bloco constituinte da placa, consiste no Conversor Analógico-Digital de 12 bits, AD1674JN, que recebendo o sinal analógico proveniente da placa pré-amplificadora, condicionado entre 0 e 10 V, efectua a sua amostragem e digitalização em 12 bits, sincronizada pelo sinal “ADC convert” (pino 1 da ficha D25 de entrada).

(1) Circuitos dotados de entradas com histerese são circuitos que apresentam níveis diferentes de reacção nas transições 0 – 1 e 1 – 0, isto é, o nível de tensão a que reagem quando na entrada aparece um flanco ascendente é superior ao nível de reacção num flanco descendente, evitando-se assim transições indesejáveis ocasionadas por ruído.

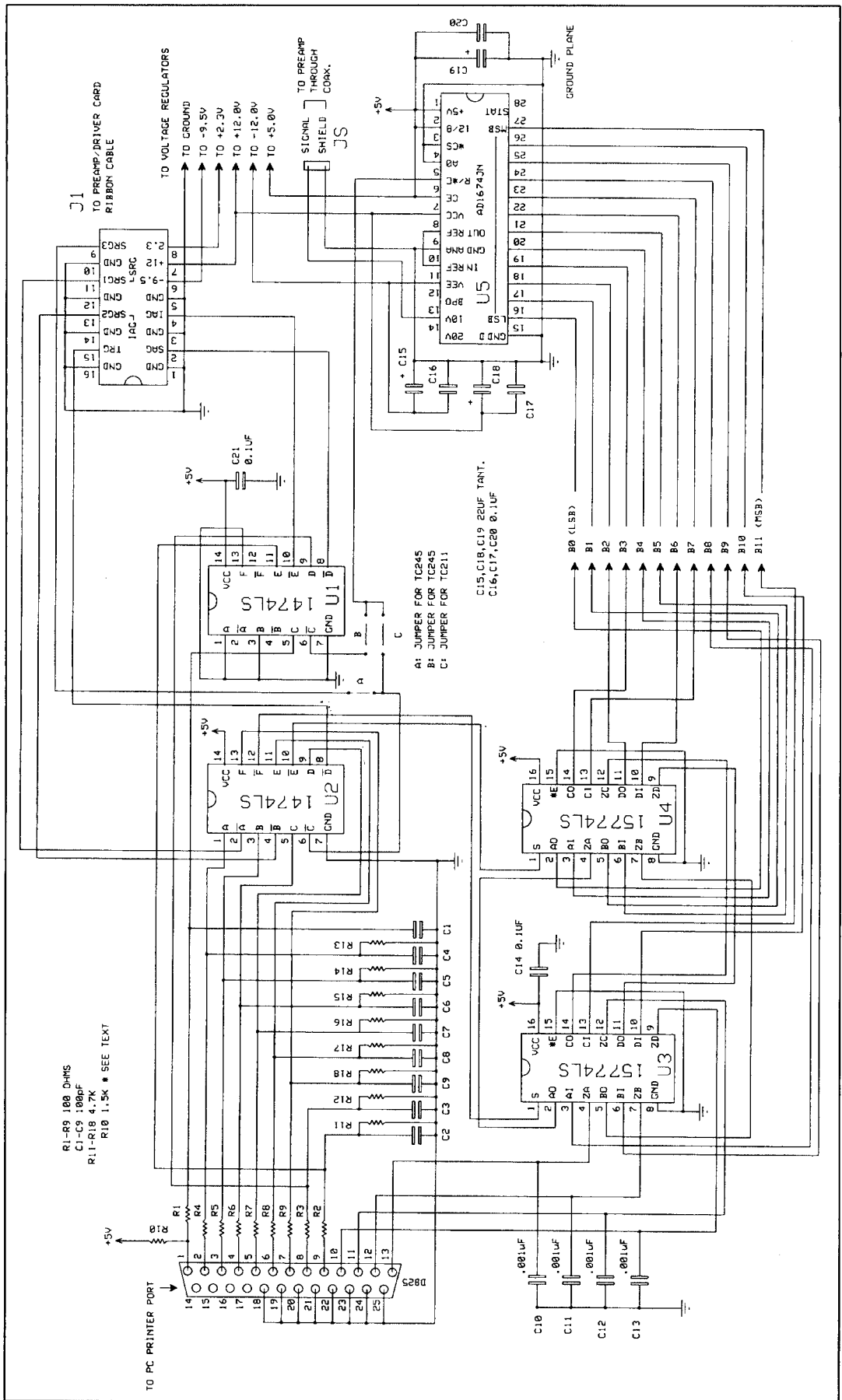


Figura 4.19 – Esquema eléctrico da secção de tratamento dos sinais de entrada e saída da placa de interface.

Contudo, como anteriormente referido, só estão disponíveis 4 linhas de transmissão no sentido placa – computador, pelo que os 12 bits resultantes da digitalização terão de ser multiplexados em três grupos de 4 bits. Tal operação é efectuada pelos circuitos integrados U3 e U4 (“multiplexers” TTL 74LS157), controlados e sincronizados pelos sinais de “clock” MUX U3 e MUX U4 (respectivamente, pinos 7 e 6 da ficha de entrada - cf. tabela 4.3). O processo e sequência de transmissão do sinal digital multiplexado resultante, encontram-se descritos na tabela 4.4.

Nibble	Bits de conversão	MUX U3	MUX U4	Pinos na ficha D25
Mais Significativo	11 (MSB)	0	X	11
	10	0	X	10
	9	0	X	12
	8	0	X	13
Intermédio	7	1	0	11
	6	1	0	10
	5	1	0	12
	4	1	0	13
Menos Significativo	3	1	1	11
	2	1	1	10
	1	1	1	12
	0 (LSB)	1	1	13

Nota: “X” representa valor lógico indiferente.

Tabela 4.4 – Multiplexagem dos 12 bits resultantes da conversão analógica-digital em três grupos de 4 bits (nibbles) para transmissão pelas linhas disponíveis na porta paralela.

A montagem das placas não oferece dificuldades de maior, em virtude de tanto os circuitos impressos como os componentes virem incluídos no Kit adquirido. O documento de referência [Ref. 2], inclui uma disquete com software de apoio e teste à montagem (ficheiro CARD.EXE), permitindo a sua execução por fases, testes à funcionalidade dos vários sistemas implementados e depuração de eventuais erros ou defeitos de execução.

Finalizada a soldadura de componentes e construídos os cabos e fichas necessárias, procedeu-se à instalação final da placa em caixa de alumínio adequada, com as dimensões de 16x10 cm e 4 cm de altura, sobre a qual foram

realizadas as perfurações necessárias à montagem das fichas. A comunicação com a placa pré-amplificadora é realizada por dois cabos “flat-cable” de 8 condutores cada, soldados a um “socket” que é inserido na ficha J1 (figura 4.19), e por um cabo coaxial que transporta o sinal vídeo analógico. Estes três cabos saem da caixa por uma ranhura lateral, protegidos contra choques e desgastes mecânicos por braçadeiras e fita isoladora.

Convém ainda referir que os reguladores de tensão VR1 e VR3 (figura 4.18) devem ser montados com dissipadores de calor. Para o regulador VR3 (LM337) que fornece $-9,5\text{ V}$, pode ser utilizado um pequeno dissipador próprio para o tipo de invólucro do dispositivo, evitando a possibilidade de curto-circuito à caixa metálica, em virtude do respectivo invólucro estar polarizado á tensão do terminal de saída, isolando a caixa metálica internamente com fita isoladora na zona do referido dissipador. O regulador VR1 que debita $+5\text{ V}$ e uma corrente relativamente elevada (250 mA) necessita de maior superfície de dissipação pelo que foi instalado sobre a caixa exterior (invólucro não polarizado neste caso).

As fotografias reproduzidas nas figuras 4.20 e 4.21 permitem apreciar os aspectos construtivos referidos.

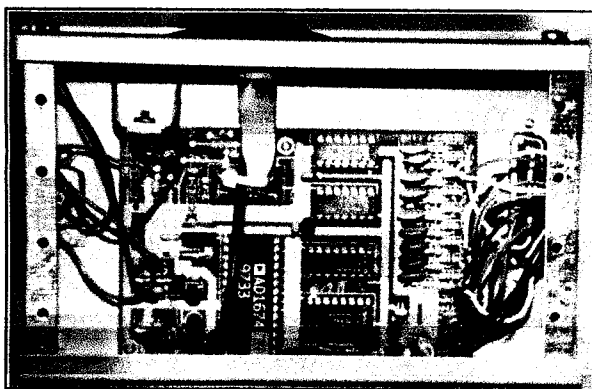


Figura 4.20 – Placa de interface, vista interior.

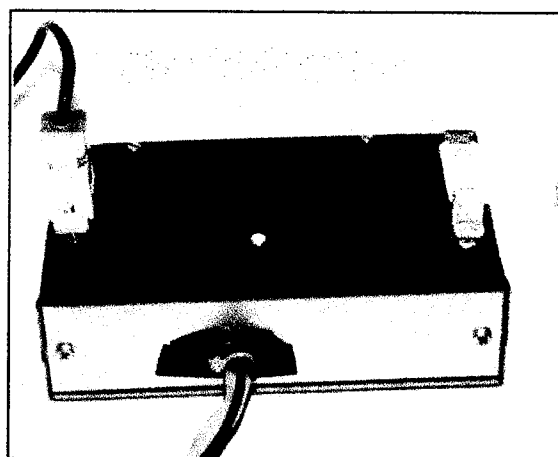


Figura 4.21 – Placa de interface, montagem final

4.1.4.2. Placa de pré-amplificação:

Conforme se pretende ilustrar na figura 4.22, a placa de pré-amplificação é constituída por duas partes com funções distintas:

- Uma é responsável pelo tratamento dos sinais de “clock” recebidos da placa de interface, de modo a compatibilizá-los electricamente com o “chip” detector;
- Na outra realiza-se a pré-amplificação do sinal vídeo recebido do detector, preparando-o para a conversão analógico-digital.

De modo a evitar que o fraco sinal vídeo de saída do detector seja corrompido por interferências de origem electromagnética, o comprimento dos condutores de ligação, entre o detector e o pré-amplificador do sinal, deverá ser tão pequeno quanto for possível, razão pela qual esta placa será instalada sobre o corpo da câmara, como adiante se especificará.

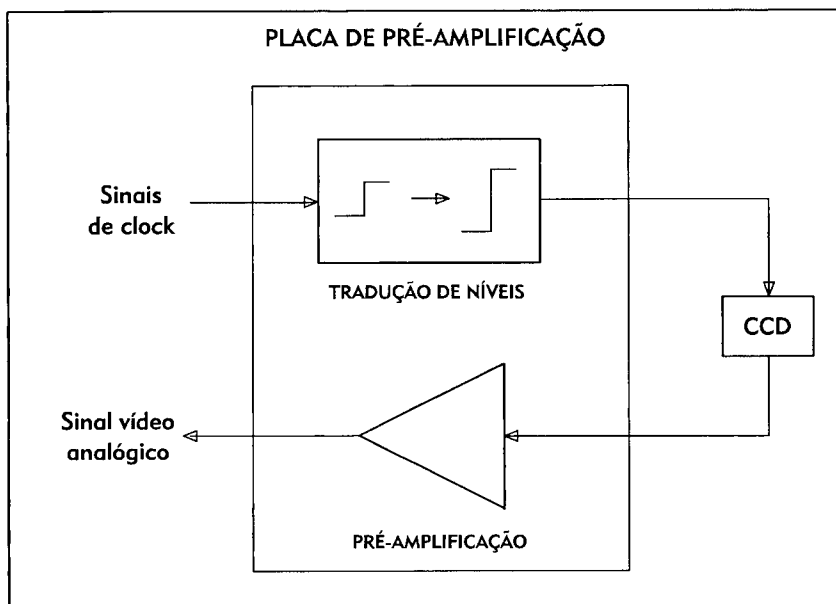


Figura 4.22 – Diagrama funcional da placa de pré-amplificação.

Os sinais de “clock” são processados pela placa de interface e atingem a placa de pré-amplificação no formato TTL, isto é, o nível lógico baixo corresponde a um nível de tensão de cerca de 0 Volts e o alto a cerca de +5 Volts. O detector CCD funciona com sinais num formato diferente (CMOS), onde o nível lógico baixo é codificado por uma tensão de -9,5 Volts e o alto por +1,75 Volts. Sendo assim, haverá a necessidade de efectuar uma tradução de níveis de tensão, antes de

actuar o detector CCD, o que se consegue com circuitos como o esquematizado na figura 4.23.

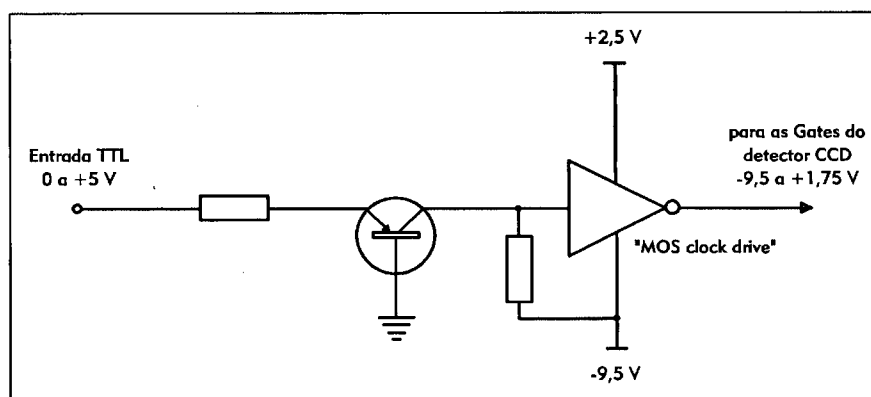


Figura 4.23 – Esquema básico de um circuito tradutor de níveis eléctricos.

O circuito anterior terá de ser repetido seis vezes na placa (um por cada linha de “clock”), sendo implementado com os transístores Q1 a Q6 (PNP 2N2907) e os circuitos integrados inversores “MOS clock driver” U7 a U10 (DS0026), conforme se pode verificar no esquema geral da placa representado na figura 4.25.

Segundo o fabricante, [Ref. 26], o detector CCD gera na saída um sinal de $4\mu\text{V}$ por electrão detectado (valor típico), possuindo os poços de potencial dos fotoelementos da área de imagem, capacidades da ordem de 80.000 electrões. Utilizando técnicas de “binning” interno, um pacote de cargas no andar de saída pode atingir, em situação de saturação, um valor máximo de cerca de 110.000 electrões, a que corresponde uma variação dinâmica do sinal vídeo de saída de aproximadamente 500 mV, (variação do sinal correspondente a leituras de pacotes de cargas de poços de potencial vazios e saturados). Por outro lado, o sinal vídeo de saída do detector decresce com o aumento de electrões detectados, possuindo uma componente contínua (polarização) de cerca de 4 Volts. Ora, o conversor analógico – digital funciona com variações dinâmicas de 0 a +10 Volts, devendo o valor superior corresponder ao máximo de carga detectada. Sendo assim, de modo a promover a compatibilidade do sinal na entrada do conversor, a secção de pré-amplificação da placa terá de efectuar, sobre o sinal vídeo de saída do detector, as seguintes operações:

- Subtração da componente contínua;
- Inversão do sinal;
- Amplificação de $\approx 20 \times (10\text{V}/500\text{mV})$.

Tal é obtido com o circuito electrónico representado na figura 4.24.

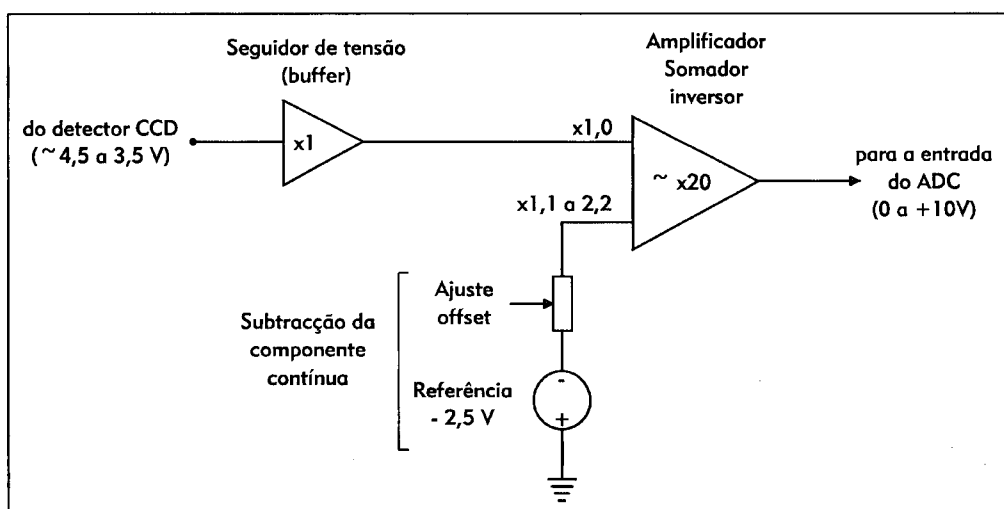


Figura 4.24 – Esquema básico do circuito pré-amplificador.

O circuito seguidor de tensão funciona como amplificador tampão de ganho unitário, permitindo isolar o detector CCD do restante circuito e sendo implementado pelo transistor Q7 (NPN 2N3904), de acordo com o esquema geral da placa, representado na figura 4.25,. O amplificador somador inversor é realizado pelo circuito integrado U6 (amplificador operacional LF356), sendo o ganho definido pela razão entre os valores das resistências R43 e R45. A fonte de tensão de referência de $-2,5\text{ V}$ é obtida pelo circuito integrado regulador U11 (LM336), sendo o ajuste da componente contínua ("offset") a subtrair, realizado por P1, potenciômetro de dez voltas com o valor de $1\text{K}\Omega$, acessível do exterior para ajustes durante a operação da câmara.

Para a montagem desta placa, que também não se revela difícil, a disquete incluída no documento de referência [Ref. 2] possui software de apoio e teste à montagem (ficheiro PREAMP.EXE). Os cabos "flat-cable" que transportam as alimentações e sinais de "clock" são directamente soldados na placa, assim como os terminais do cabo coaxial que transporta o sinal vídeo até à placa de interface.

Como já referido, a placa de pré-amplificação é instalada sobre o corpo da câmara, sendo os contactos eléctricos com o detector CCD, e alguma sustentação mecânica, assegurados pelas fichas J2-J3, improvisadas a partir de dois conjuntos de 8 terminais em linha colados lado a lado, montados na parte inferior do circuito impresso e soldados no lado dos componentes como esquema de pormenor da figura 2.26. De modo a evitar a ocorrência de curtos-circuitos entre o lado das soldaduras da placa e o corpo da câmara, aquele foi revestido por fita isoladora.

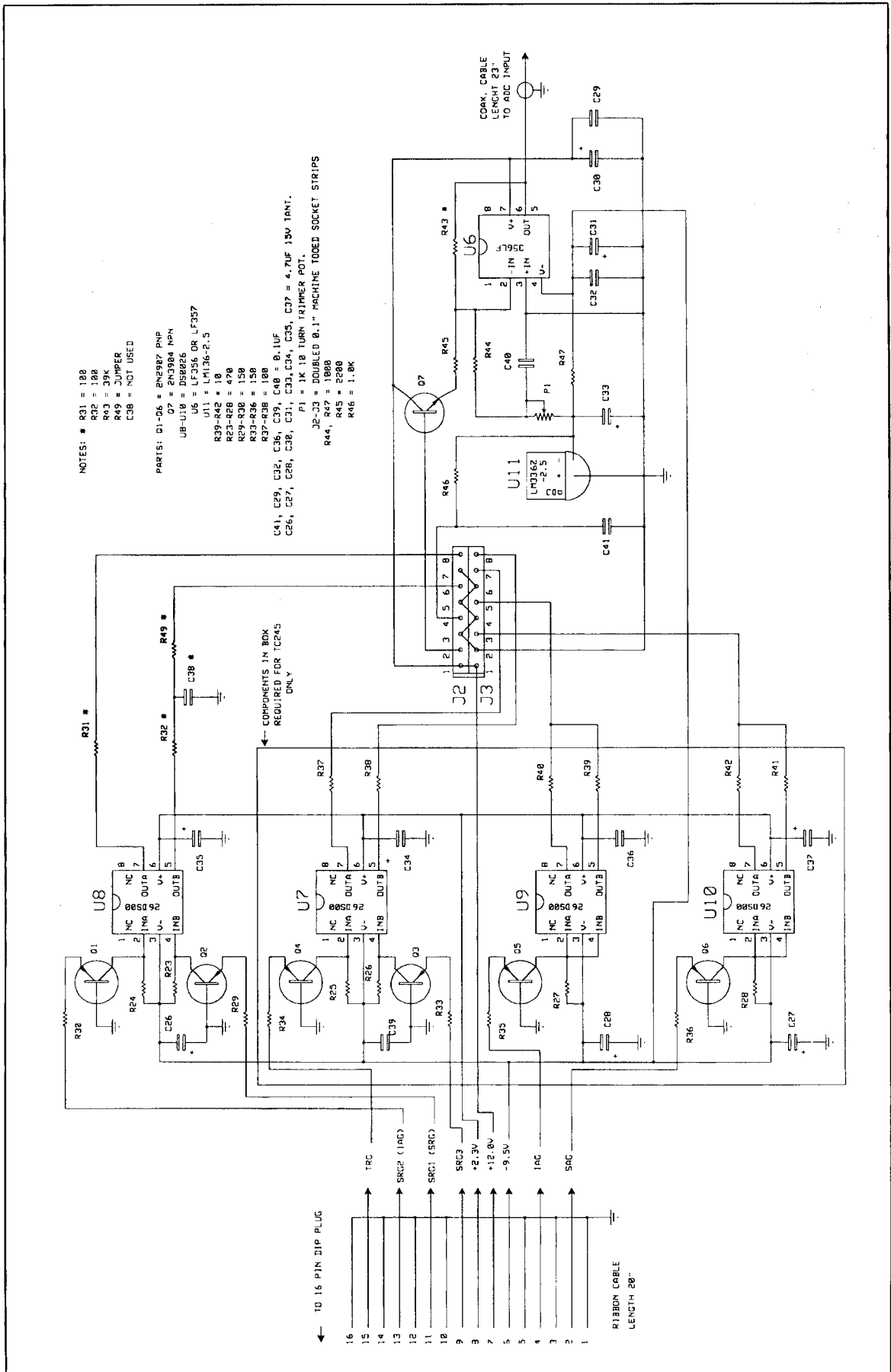


Figura 4.25 – Esquema eléctrico geral da placa de pré-amplificação.

A placa será fixada ao corpo da câmara e protegida contra choques mecânicos por uma estrutura realizada em folha de alumínio dobrada, conforme as especificações referidas na secção 4.1.5.

As figuras 4.27 e 4.28 reproduzem fotografias onde se procuram mostrar os aspectos construtivos referidos e o aspecto final da montagem.

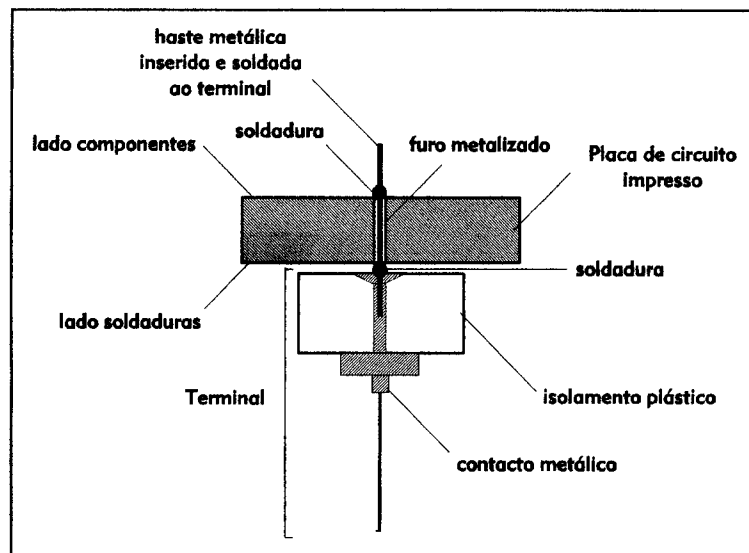


Figura 4.26 – Corte do pormenor da construção e montagem das fichas J2-J3.

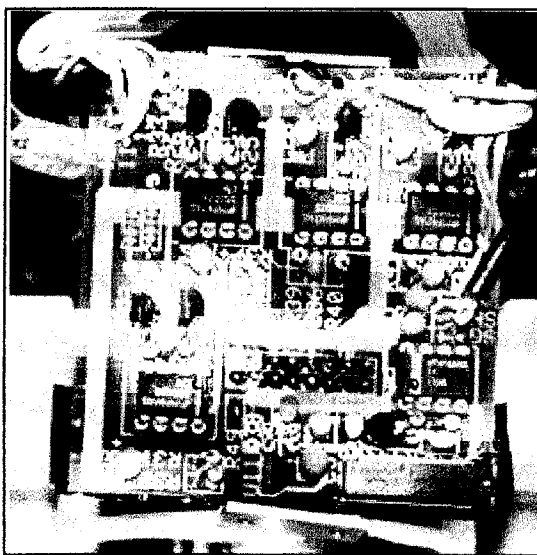


Figura 4.27 – Placa de pré- amplificação, vista pelo lado dos componentes.

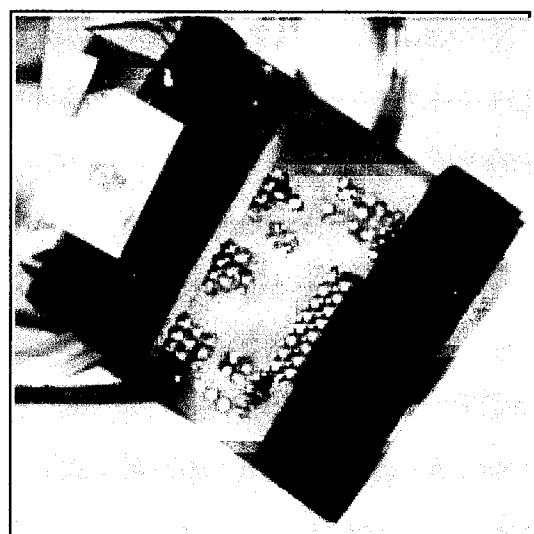


Figura 4.28 - Placa de pré- amplificação, vista pelo lado de soldadura.

4.1.5. Corpo da Câmara:

O corpo da câmara consiste numa estrutura metálica estanque que aloja o “chip” detector CCD de modo a ser refrigerado por acção de um módulo de Peltier, assegura a circulação do fluido de refrigeração para a extracção do calor gerado pelo funcionamento daquele módulo, e permite a montagem do sistema num tubo de ocular de um telescópio, centrando a superfície sensível do detector no respectivo eixo óptico. A figura 4.29 representa um corte do corpo da câmara, possibilitando a identificação dos vários elementos constituintes.

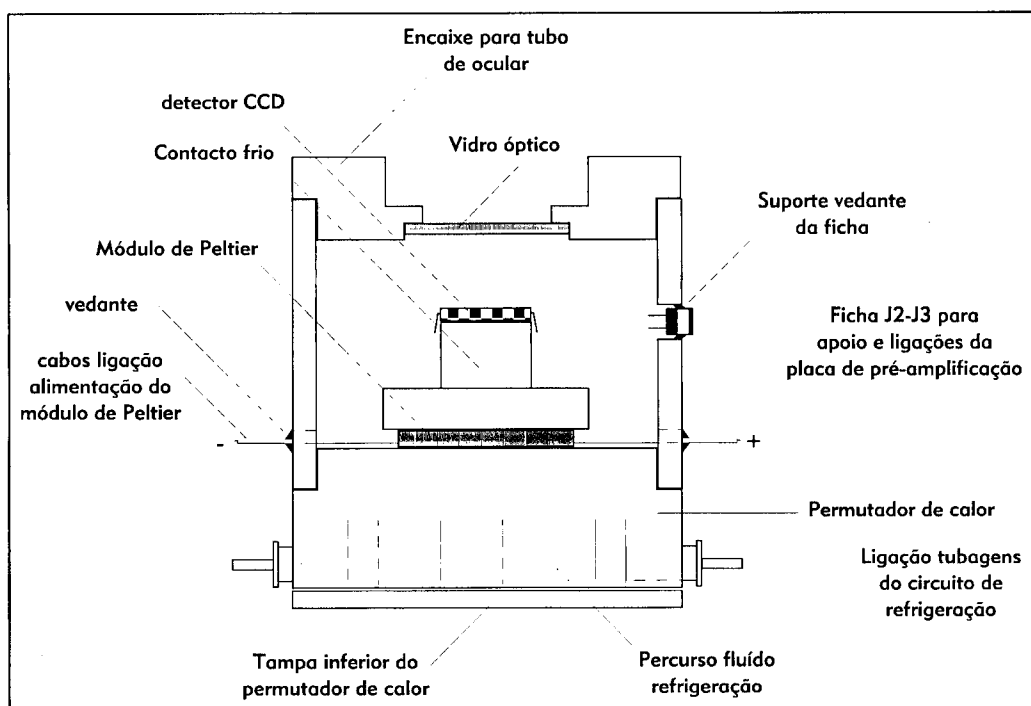


Figura 4.29 – Corte do corpo da câmara, permitindo identificar os seus elementos constituintes.

A execução das peças metálicas que constituem o corpo da câmara, embora não seja complexa e a obra de referência, [Ref. 2], contenha informação detalhada e esquemas de pormenores suficientemente bem desenhados, exige a manipulação de tornos mecânicos e aptidões de serralharia que não estarão ao alcance de todos os interessados na prossecução do projecto, ou então, o recurso ao apoio especializado de terceiros. Optou-se por requerer a inclusão das peças maquinadas no Kit adquirido, cujo conjunto se encontra reproduzido na fotografia da figura 4.30.

Esta fase da construção da câmara CCD revela-se a mais delicada e complexa, em virtude da precisão requerida e da utilização de diversos materiais e

técnicas de colagem, fixação, soldadura e vedantes, fundamentais para o bom funcionamento do produto final.

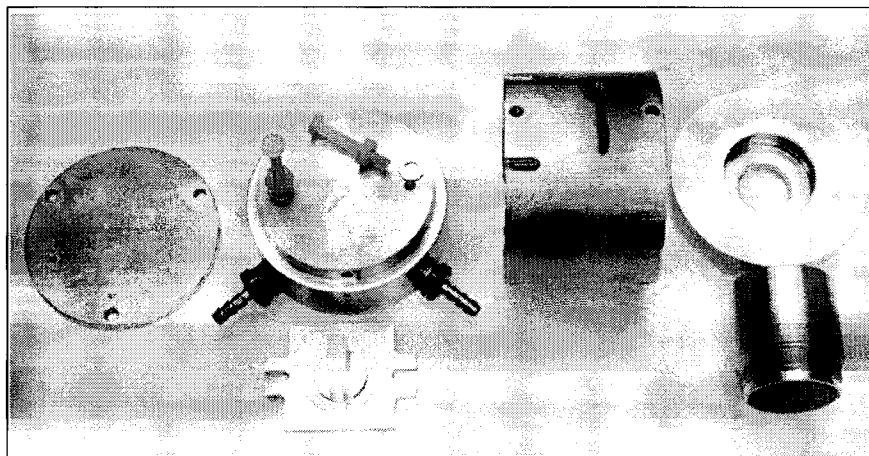


Figura 4.30 – Peças maquinadas para o corpo da câmara incluídas no Kit adquirido.

A montagem foi iniciada pela construção do permutador de calor, que constitui a base do corpo. Em virtude de nesta peça circular o fluido refrigerante, num percurso em serpentina escavado no metal, a fim de assegurar a remoção do calor gerado pelo funcionamento do módulo de Peltier, é necessário proceder à junção das diversas peças com materiais vedantes. Assim, as peças metálicas de ligação às tubagens do circuito de refrigeração são enroscadas lateralmente na peça, sendo as roscas vedadas por fita vedante tipo “Teflon”, normalmente utilizada em canalizações de água. Para a instalação da tampa inferior utilizou-se corticite prensada, de 1 mm de espessura, impregnada em cola vedante, materiais usualmente utilizados na confecção de juntas de cabeça de motores de combustão, tendo sido adquiridos em casa comercial de acessórios para automóveis. Cortou-se a corticite à medida da tampa e aplicou-se uma camada de cola numa das faces. A superfície inferior do permutador de calor, depois de limpa de limalhas e gorduras com acetona, foi também untada com cola vedante. Após terem-se deixado secar as superfícies, estas foram firmemente pressionadas uma contra a outra e apertadas pelos parafusos de fixação. A figura 4.31 mostra alguns pormenores de execução desta fase de montagem.

De seguida procedeu-se à instalação do módulo de Peltier, sobre a superfície superior do permutador de calor, previamente limpa com acetona. É necessário identificar as faces (fria e quente) do módulo experimentalmente, recorrendo a uma pilha de 1,5 Volts, cujo terminal positivo se liga ao cabo encarnado de alimentação

do módulo e o preto ao negativo, segurando o dispositivo entre dois dedos. Decorridos poucos segundos sente-se facilmente um diferencial de temperatura entre as faces. A mais quente, marca-se e deita-se sobre a superfície do permutador de calor, sendo a junção térmica assegurada com a aplicação de massa térmica de silicone, já anteriormente utilizada nas instalações de dissipadores em componentes electrónicos.

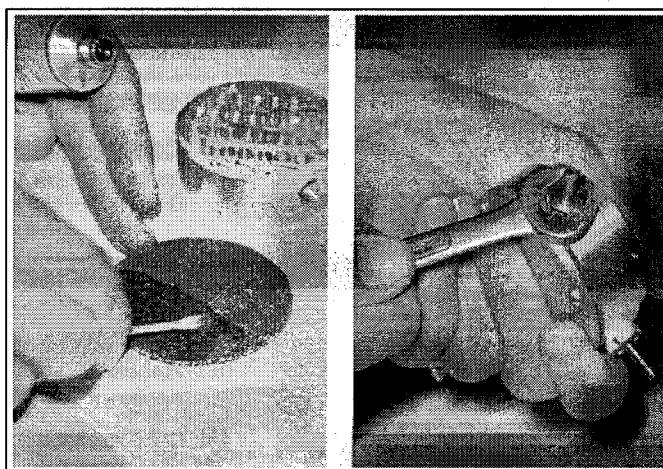


Figura 4.31 – Alguns pormenores de execução da montagem do permutador de calor.

Sobre a face fria foi instalada a peça metálica que constitui o contacto frio, sendo também tratadas as superfícies de contacto com massa térmica de silicone, e o conjunto fixado por meio de dois parafusos e respectivas porcas de nylon, fornecidas no Kit. Antes da fixação final, convém testar toda a instalação, nomeadamente acertar os pontos de saída dos cabos de alimentação do módulo de Peltier, com os orifícios respectivos existentes na peça que forma as paredes laterais do corpo. Finalizada, esta fase de montagem terá o aspecto reproduzido na figura 4.32.

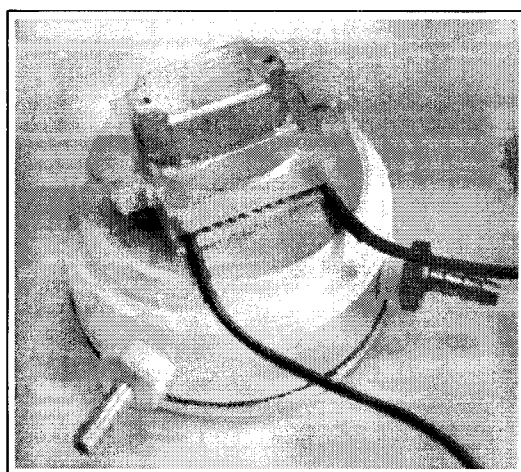


Figura 4.32 – Aspecto final da montagem do módulo de Peltier e contacto frio sobre o permutador de calor.

A instalação e manuseamento do “chip” detector constitui a fase mais delicada de toda a operação, em virtude deste componente ser dispendioso e de difícil substituição. Sendo construído segundo a tecnologia MOS, é sensível a cargas eléctricas de origem estática, que podem desenvolver tensões no óxido dieléctrico suficientes para ocasionar a sua disrupção, inutilizando o dispositivo. Requer, portanto, especiais cuidados no seu manuseamento, sendo aconselhável manter os seus terminais curto-circuitados, envolvendo-os em folha de alumínio, de modo a protegê-los contra os efeitos da electricidade estática, e garantir uma boa ligação à terra de quem não puder evitar tocar-lhe (pulseira com contacto metálico, ligado por cabo extensível, terminado em garra, a um ponto de terra). As operações de soldadura sobre terminais do “chip” devem ser executadas rapidamente, por meio de um ferro-de-soldar com ligação à terra (no caso de tal não estar disponível, pode ser improvisado por cabo de cobre nu, com terminações em garras metálicas, presas de um lado no terminal de terra de uma tomada e no outro ao corpo da ponta quente do ferro-de-soldar).

De modo a evitar a execução de soldaduras directamente nos pinos do “chip” detector, foi requerida a inclusão no Kit de duas barras de terminais próprias (“socket strips”) nas quais encaixa o dispositivo, em virtude da distância entre pinos neste circuito integrado ser diferente do valor standard.

Face aos riscos envolvidos nesta operação, à sua dificuldade e precisão exigida, optou-se por adoptar uma sequência de procedimentos distinta da sugerida na obra de referência, [Ref. 2], que em seguida se descreve.

Em primeiro lugar preparou-se a ficha, a aplicar na ranhura para o efeito existente na peça metálica cilíndrica que forma as paredes laterais do corpo da câmara, destinada ao suporte e ligações eléctricas à ficha J2-J3 da placa de pré-amplificação. O procedimento é análogo ao descrito na secção 4.1.4.2, consistindo na colagem lado a lado de dois conjuntos de 8 terminais em linha. De modo a garantir a adaptação perfeita entre esta e a ficha J2-J3 já instalada na placa, sugere-se que, após a aplicação de cola (cianoacrilato) numa das superfícies, em pouca quantidade de modo a não escorrer, se insiram as fichas uma na outra e se pressione para consumir a colagem nesta posição, ficando deste modo garantido o futuro perfeito encaixe entre ambas.

Realizada esta operação pôde-se proceder à soldadura dos cabos que interligam esta ficha às barras de terminais onde será inserido o detector CCD.

Deste modo evita-se a realização de soldaduras no espaço confinado do interior do corpo da câmara, melhorando a precisão da operação. Contudo, em virtude das fichas e suportes do detector não estarem instaladas na posição final, convém estudar convenientemente o seu arranjo definitivo, marcar as suas posições e referenciar a ordem de contagem dos terminais para evitar erros de ligação e poder decidir qual o comprimento dos cabos a utilizar. Estes cabos de interligação deverão ser tão finos e flexíveis quanto possível e com o comprimento exacto, uma vez que são em número elevado (16) e terão de ocupar, na posição final de instalação, um espaço reduzido no interior do corpo da câmara. De modo a garantir a fiabilidade das soldaduras e evitar futuros curtos-circuitos acidentais, devidos ao reduzido espaço existente entre terminais e entre estes e as superfícies metálicas do corpo da câmara, é conveniente preparar devidamente as pontas, cortando-as á medida necessária para realizar a soldadura e estanhando-as previamente.

O esquema de ligações está representado na figura 4.33.

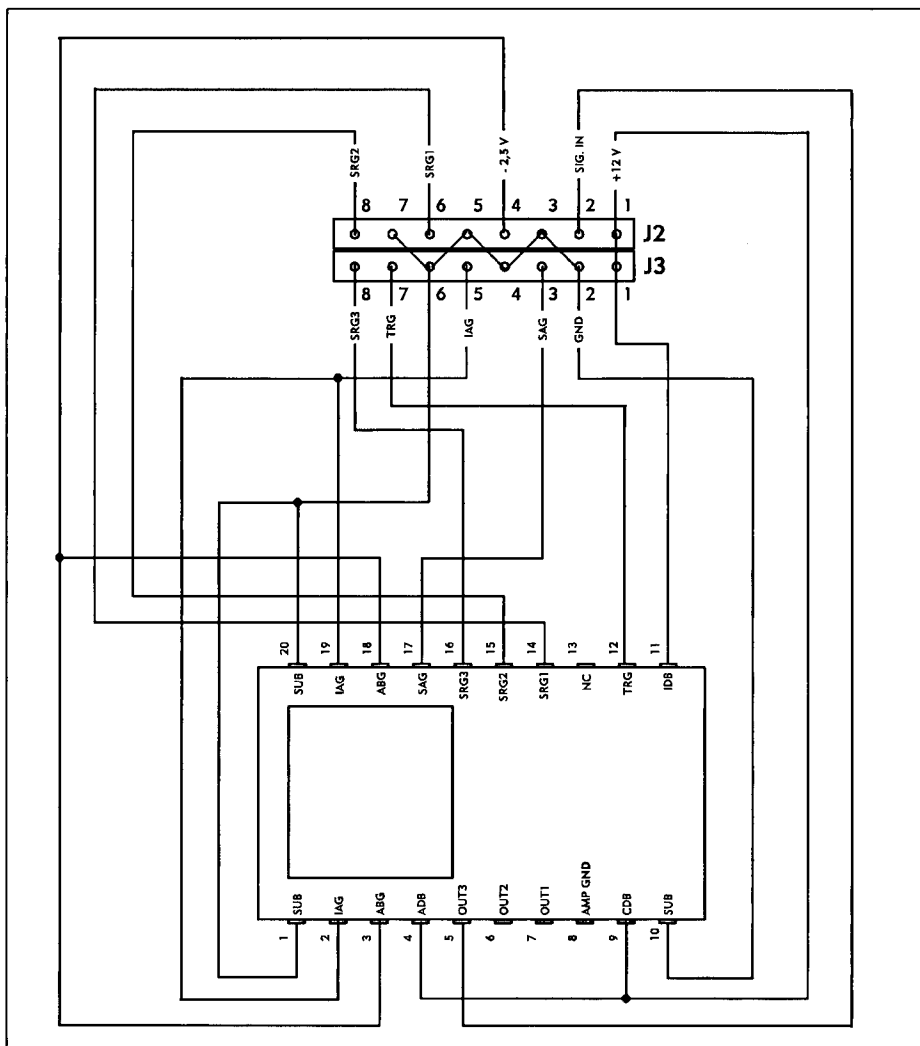


Figura 4.33 – Esquema de ligações entre a ficha J2-J3 e o circuito integrado detector TC245.

A operação seguinte consiste em inserir cuidadosamente os suportes específicos, já com os cabos soldados, no circuito integrado do detector, respeitando a orientação predefinida, as precauções anti-estáticas requeridas e utilizando a força mínima necessária de modo a não partir ou dobrar nenhum pino do dispositivo. Para a instalação final do detector no topo do contacto frio, recorre-se também a massa térmica de silicone para garantir bom contacto térmico, sendo a fixação na posição definitiva assegurada por duas pequenas peças de nylon (“chip clips”), especialmente desenhadas para o efeito e incluídas no Kit, conforme se pretende ilustrar com a figura 4.34.

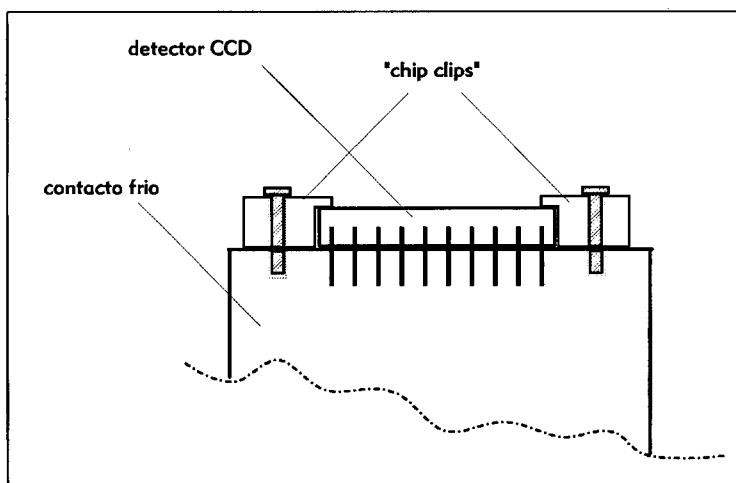


Figura 4.34 – Pormenor de fixação do detector CCD sobre o contacto frio.

A peça metálica cilíndrica que forma as paredes laterais do corpo da câmara pode ser agora colocada na posição definitiva. De modo a assegurar a selagem com o exterior, minimizando o risco de embaciamento por condensação do ar atmosférico húmido, é aconselhável envolver o encaixe no permutador de calor com duas voltas de fita vedante tipo “Teflon”. A colocação da peça no encaixe e acerto dos eixos dos parafusos de fixação devem ser executados cuidadosamente a fim de não ferir ou mesmo partir os cabos de alimentação do módulo de Peltier, que saem para o exterior por duas ranhuras laterais.

Resta fixar a ficha de ligação à placa de pré-amplificação na sua posição definitiva. A ranhura existente para o efeito e a área envolvente, assim como a própria ficha, deverão ser previamente limpas com acetona, água e detergente, até ficarem completamente isentas de gordura e sujidade. A ficha deverá ser centrada na ranhura e fixada de modo aos terminais do lado interior não tocarem no metal envolvente, e aos contactos exteriores, onde encaixará a placa de pré-amplificação,

ficarem ligeiramente sobressaídos, conforme se ilustra na figura 4.35. A colagem foi realizada com cola epóxida de secagem rápida (“Nural 23”), produto que necessita da prévia combinação dos seus dois componentes, em duas fases:

- Aplicou-se uma fina camada de produto colante num dos lados da ficha e ao redor da face da ranhura metálica, colocando a ficha na sua posição definitiva e esperando o intervalo de tempo necessário à sua perfeita fixação (≈ 15 minutos);
- Realizou-se, depois, a mistura de maior quantidade de cola epóxida, com a qual se preencheu todos os espaços livres restantes entre as paredes da ranhura e a ficha.

O endurecimento total do produto obtém-se em 24 horas, à temperatura de $+20^{\circ}\text{C}$, podendo então ser trabalhado para acabamentos (desgastado, lixado e pintado).

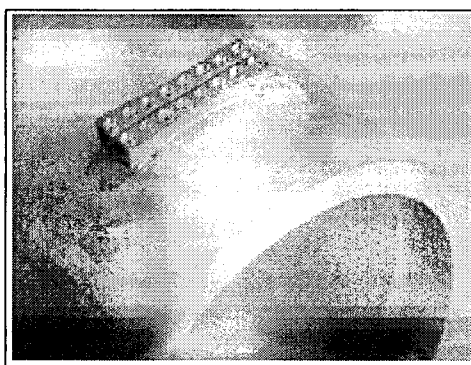


Figura 4.35 – Aspecto final da fixação da ficha de ligação à placa de pré-amplificação.

A montagem do corpo da câmara termina com o fecho da parte superior pela peça maquinada destinada ao encaixe no porta-oculares de um telescópio. Antes de proceder à realização desta operação, convém limpar o interior do corpo da câmara de poeiras (com jacto de ar comprimido, por exemplo) e retirar a película plástica de protecção existente sobre a superfície sensível do detector CCD.

O vidro óptico, que assegura o percurso da radiação luminosa até à superfície do detector, conforme esquematizado na figura 4.29, foi colado na sua posição por intermédio de silicone, após ter sido cuidadosamente limpo em solução de amónia e água desmineralizada.

A selagem da junção desta peça com as paredes laterais da câmara foi também aqui obtida com o recurso a fita vedante “Teflon” disposta em redor do encaixe.

Finalmente completou-se a selagem do corpo da câmara, preenchendo as ranhuras, por onde saem os cabos de alimentação do módulo de Peltier, com cola derretida a pistola, normalmente utilizada na colagem de cabos eléctricos. A fim de evitar contaminação luminosa lateral, estas selagens foram pintadas com tinta preta baça, assim como a da ranhura da ficha J2-J3.

O aspecto final do corpo da câmara encontra-se reproduzido na figura 4.36.

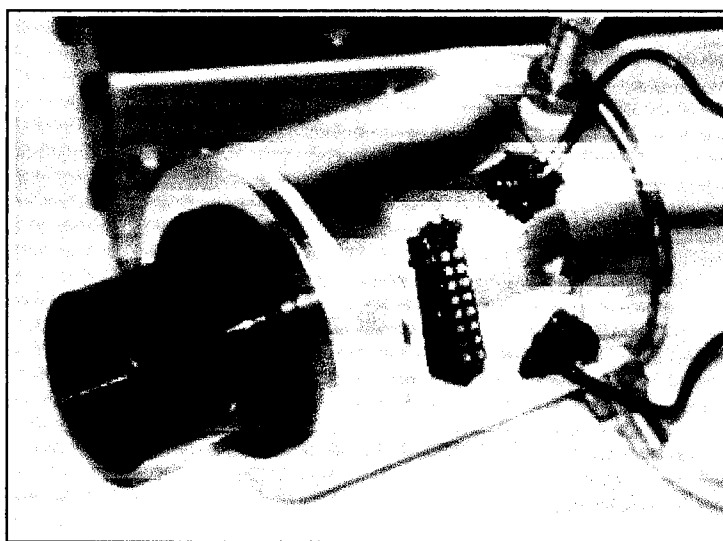


Figura 4.36 – Aspecto final do corpo da câmara.

A instalação da placa de pré-amplificação sobre o corpo da câmara, de modo permanente e mecanicamente estável, realiza-se por meio de duas peças de chapa de alumínio em “L”, incluídas no Kit, que fixam a placa ao corpo da câmara e a uma estrutura de protecção, executada em folha de alumínio de 0,75 mm de espessura, segundo as especificações da figura 4.37. Após o corte da folha nas medidas indicadas procede-se à sua dobragem segundo as arestas marcadas no interior, formando uma caixa de dimensões 70 x 63,5 mm, com a altura de 27 mm, que é fixada por meio de parafusos às chapas acima referidas e ao corpo da câmara.

Os cabos que saem desta estrutura, ligações eléctricas da placa e alimentações do módulo de Peltier, foram agrupados e presos à estrutura protectora por meio de braçadeiras plásticas inseridas nos furos para o efeito disponibilizados. De modo a não serem feridos pela aresta da folha de alumínio, esta foi envolvida em fita isoladora.

As figuras 4.38 e 4.39 reproduzem fotografias da instalação final, permitindo apreciar os pormenores referidos.

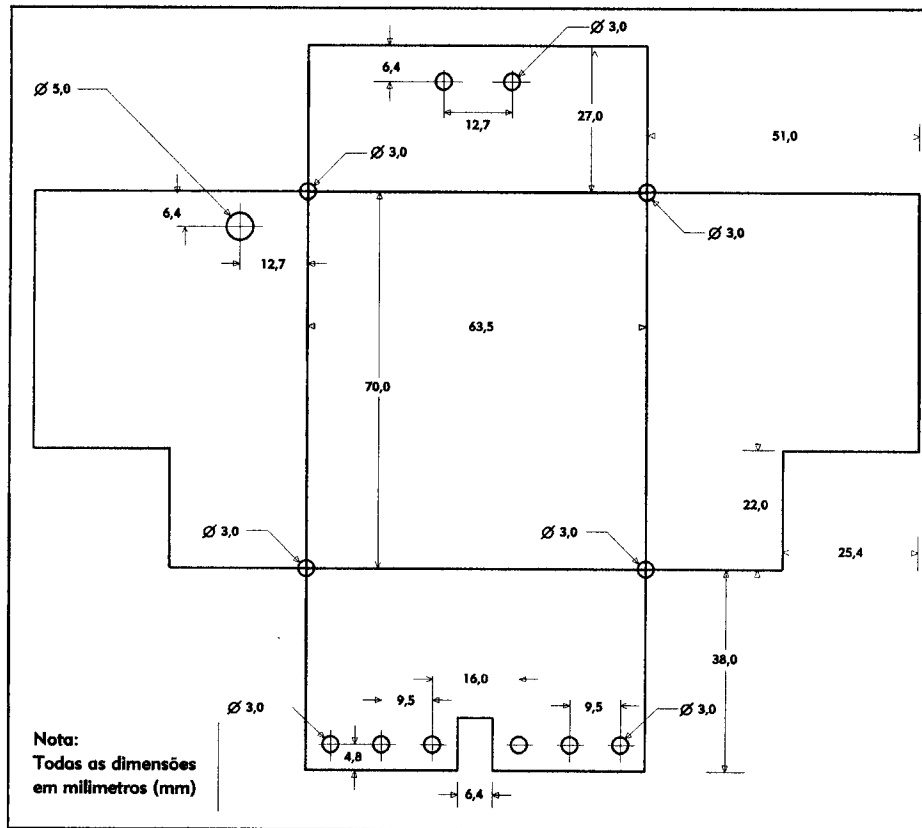


Figura 4.37 – Especificações de corte e dobragem da folha de alumínio para construção da estrutura de protecção da placa de pré-amplificação.

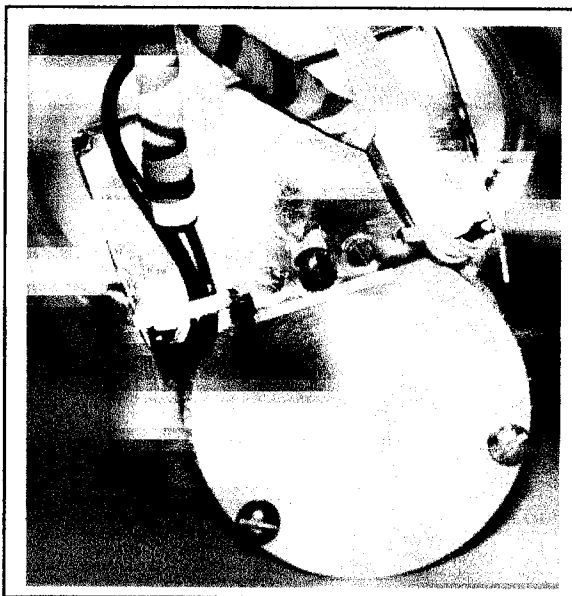


Figura 4.38 – Pormenor de saída dos cabos da estrutura protectora da placa de pré-amplificação.

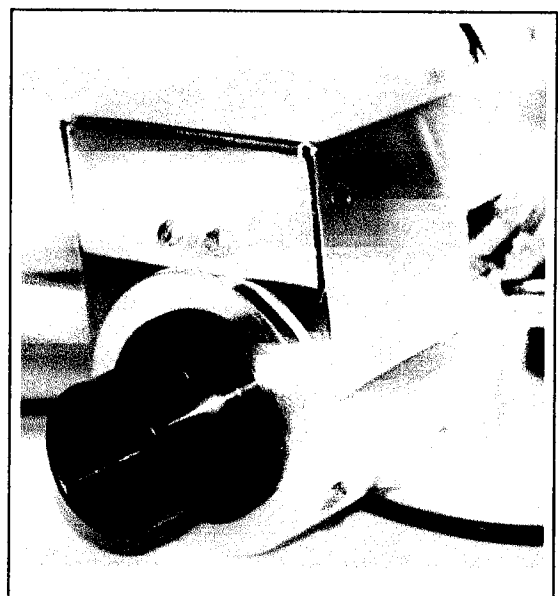


Figura 4.39 – Vista frontal da estrutura protectora, e orifício lateral de acesso ao potenciómetro P1.

4.1.6. Sistema de Refrigeração:

De modo a obter o melhor desempenho da câmara na aquisição de imagem, o “chip” detector CCD deverá operar à temperatura de -30°C ou inferior, reduzindo ao mínimo a quantidade de cargas geradas por efeito térmico (“dark current”), durante a integração da imagem, conforme anteriormente discutido nas secções 2.1.3 e 3.2.4.

Por outro lado, é conveniente que o detector mantenha uma temperatura constante em operação, uma vez que deste modo o sinal térmico não irá variar significativamente, evitando a necessidade de frequentes aquisições de “dark frames” para correcção das imagens obtidas.

O arrefecimento do detector é obtido por acção termoeléctrica no módulo de Peltier que, extraíndo permanentemente calor do “chip” para a sua face quente, através do contacto frio, permite manter um diferencial de temperatura entre aqueles elementos. Contudo, a eficiência do processo termoeléctrico, assim como a estabilidade de temperatura no detector, requerem que o calor extraído seja eficazmente removido da face quente do módulo de Peltier, não permitindo a sua acumulação e conseqüente aquecimento. A extracção e dissipação da energia calorífica desenvolvida, são obtidas por transferência térmica do módulo de Peltier para um fluido no permutador de calor do corpo da câmara.

É, portanto, necessário garantir a permanente circulação do fluido de refrigeração de modo a ser realizada a transferência energética, garantindo posteriormente a dissipação desse calor transportado pelo fluido. Tal é conseguido com um circuito fechado do fluido de refrigeração, cuja circulação é assegurada por uma bomba e a dissipação do calor transportado realizada numa serpentina de cobre mergulhada em água. A elevada capacidade de transferência térmica do banho de água permite a eficiente dissipação do calor transportado pelo fluido, estabilizando a sua temperatura e por conseqüência, as temperaturas do corpo da câmara, da face quente do módulo de Peltier e finalmente do próprio detector. A figura 4.40 esquematiza a constituição do referido circuito fechado.

A bomba utilizada é uma bomba eléctrica de injeção de água para limpeza de pára-brisas de automóvel; a serpentina é constituída por cerca de 6 metros de tubo de cobre de 6 mm de diâmetro, enrolado em 30 espiras (15 + 15 sobrepostas), formando um cilindro de aproximadamente 65 mm de diâmetro e 150 mm de altura; o circuito fechado de circulação é realizado em tubo plástico de 3 mm de diâmetro

interior e 6 mm exterior, que facilmente se pode adquirir em casas comerciais especializadas em equipamentos para aquários. No kit adquirido foi solicitada a inclusão destes itens, o que se revelou desnecessário face à relativa facilidade com que se encontram no mercado.

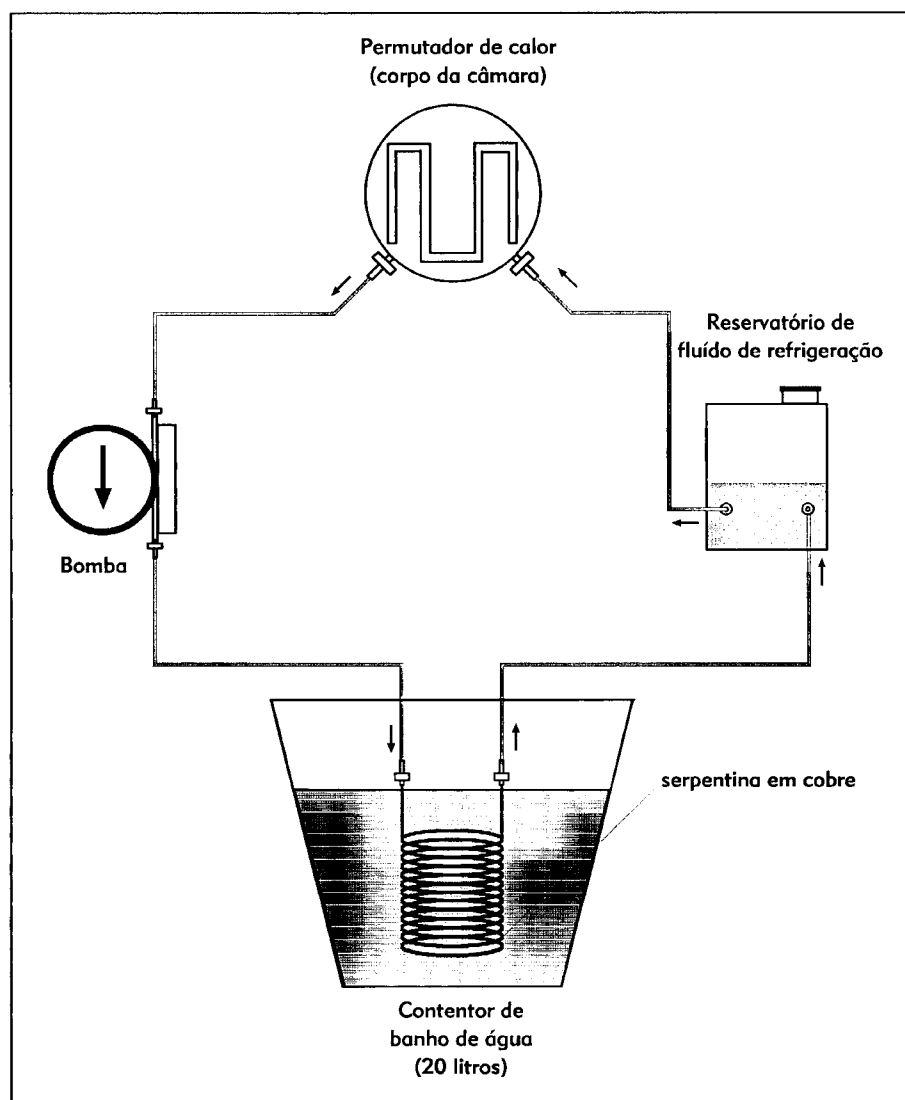


Figura 4.40 – Esquema do circuito fechado de circulação do fluido de refrigeração.

Para o banho de água referido convém dispor de um contentor com a capacidade de cerca de 20 litros, quantidade considerada suficiente para uma troca térmica eficiente. Como fluido de refrigeração usa-se uma mistura de água desmineralizada (para não deixar resíduos depositados nas tubagens) com isopropanol ou álcool etílico, nas proporções 2:1, constituindo um líquido com propriedades termodinâmicas adequadas à transferência e transporte térmico. Para facilitar o abastecimento do sistema, fecha-se o circuito com um pequeno contentor

de plástico, que irá constituir um reservatório de fluido de refrigeração, sendo suficiente 0,5 a 1 litro, para enchimento das tubagens e reserva.

O contentor do banho de água serve de base ao sistema, tendo-se construído uma tampa em madeira, com uma ranhura para passagem dos tubos de ligação à serpentina de cobre, sobre a qual se fixaram a bomba, os diversos tubos e cabos e se colou o reservatório (com cola derretida a quente). Para ligação das tubagens ao reservatório realizaram-se dois furos junto à base, onde se inseriram conexões plásticas próprias para as tubagens, assegurando-se a estanqueidade com cola derretida. A figura 4.41 reproduz uma fotografia do sistema construído.

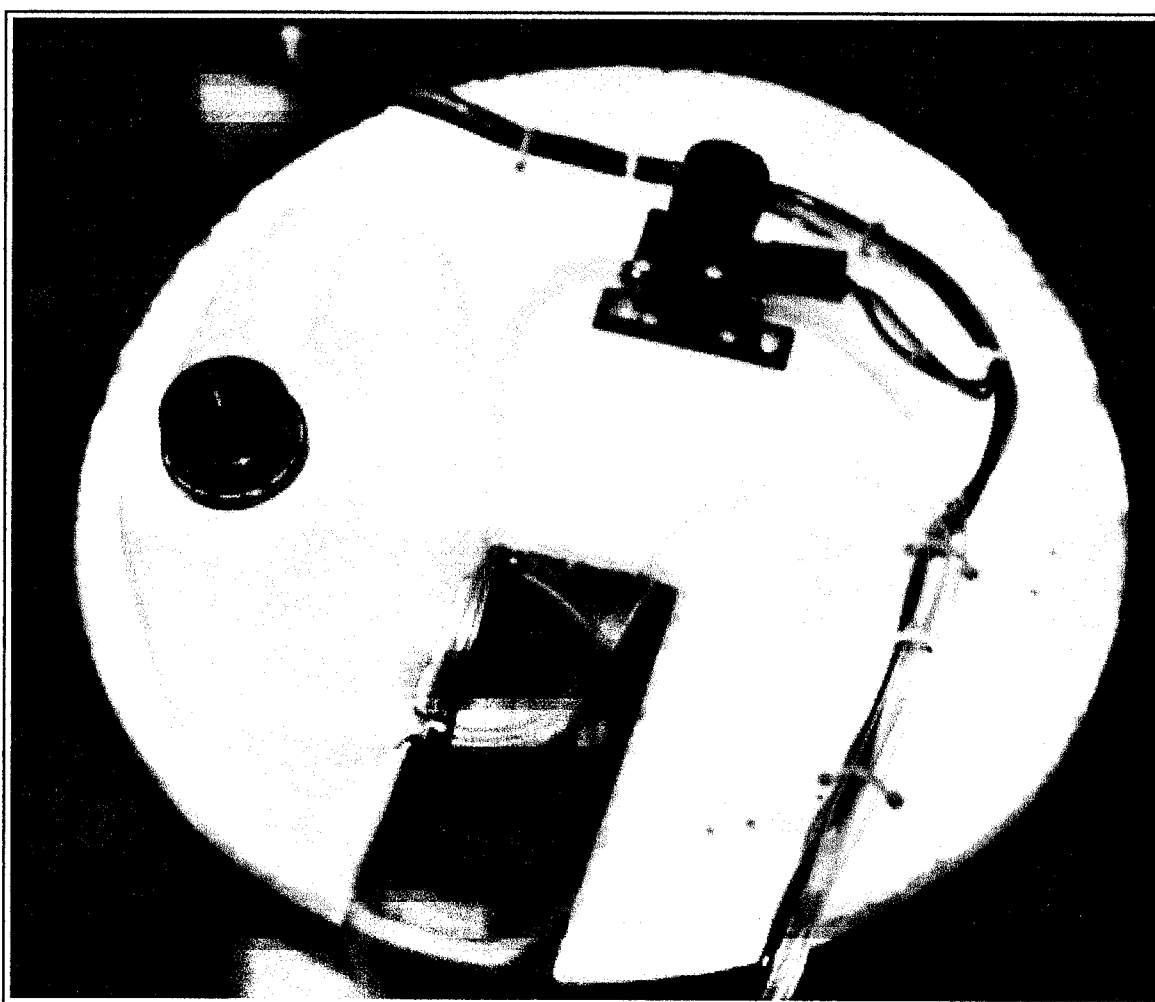


Figura 4.41 – Aspecto final do sistema de refrigeração.

4.1.7. "Software" de Controlo:

A operação da câmara CB245 é controlada, através da porta paralela de um computador, por um programa de controlo, "AP245.EXE", incluído na diskette fornecida com o documento de apoio [Ref. 2]. Este programa destina-se a ser corrido em qualquer computador compatível PC, sob o sistema operativo MS-DOS, e disponibiliza uma interface amigável com o operador, baseada em écrans acedidos através de menus, permitindo-lhe comandar as diversas funções disponíveis, das quais se destacam as seguintes:

- Aquisição de imagens em diversos modos;
- Armazenar no disco do computador os ficheiros de imagem;
- Visualizar no écran as imagens obtidas.

Indicada pelo operador qual a função a realizar, o programa encarrega-se de todos os detalhes técnicos necessários á sua execução, seja gerando os sinais de "clock" e comando requeridos pela câmara para proceder a uma aquisição de imagem num modo de "binning" escolhido, seja controlando as comunicações de dados entre a porta paralela, a memória, o disco e o écran do computador.

4.1.7.1. Formatos de imagem e ficheiros:

O operador tem a possibilidade de escolher o modo de "binning" utilizado na leitura da imagem, conforme adiante discutido (menu "Options/Binning"), e o respectivo formato da imagem, entre os seguintes disponíveis:

"378x242 full-frame" – Imagem com 378(H) x 242(V) pixels de dimensões 17 x 19,7 μm , obtida por "binning" externo, associando pixels dois a dois de colunas adjacentes("binning" 2x1). A imagem resultante é armazenada em três ficheiros de 63.007 Bytes cada, com as extensões *.P1 (linhas 0 a 80), *.P2 (linhas 81 a 161) e *.P3 (linhas 162 a 241);

"252x242 full-frame" – Imagem com 252(H) x 242(V) pixels de dimensões 25,5 x 19,7 μm , obtida por "binning" interno ou externo, associando pixels três a três de colunas adjacentes ("binning" 3x1). A imagem resultante é armazenada em dois ficheiros de 63.007 Bytes cada, com as extensões *.PA (linhas 0 a 120) e *.PB (linhas 121 a 241);

“quarter-frame”, modo focagem – Imagem com 126(H) x 121 (V) de pixels de dimensões 25,5 x 19,7 μm (“binning idêntico ao caso anterior), da região central da zona de imagem, usada para obter a focagem do sistema óptico. Pode também ser armazenada num ficheiro de 30.499 Bytes, com a extensão *.PC;

“quarter-frame”, modo pesquisa – Imagem com 126(H) x 121 (V) de pixels de dimensões 51 x 39.4 μm , obtida por “binning” composto de 6x2, podendo ser armazenada num ficheiro de 30.499 Bytes, com a extensão *.PC. Os processos de leitura e transferência são mais rápidos e a sensibilidade à luz é aumentada, permitindo localizar e centrar um objecto no campo de visão do detector;

formato “FITS” – Qualquer imagem em modo “full-frame” pode ser exportada para o formato standard “FITS – Flexible Image Transport System”. O ficheiro único resultante, com a extensão *.FITS, ocupa 187.200 Bytes no caso de imagens 378x242 e 126.720 em imagens de 252x242. Contudo, as imagens neste formato não podem ser recarregadas pelo programa “AP245”.

4.1.7.2. Interface com o utilizador e menus:

A figura 4.42 mostra o menu principal e inicial do programa “AP245”, que permite escolher a função a realizar.

```
245_MAIN MENU                RESET: 4095
I: Integrate Image           REF: 4095
M: Multiple Images
D: Display Image
F: Focus
C: Copy as Dark Frame
A: Autoguide
O: Options
P: Set New File Path
S: Store Image
G: Get Image
X: Export to FITS
Q: Quit

                                1 0
                                19:05:45
```

Figura 4.42 – Menu principal e de acesso às funções realizadas pelo programa “AP245”.

No canto superior direito aparecem dois valores de importância relevante para o ajuste da câmara:

- **“REF”** – representa o valor da contagem do conversor analógico-digital quando o nó de detecção do andar de saída se encontra comutado para o nível de referência interno. Pode ser ajustado através do potenciómetro P1 da placa de pré-amplificação, acessível a partir do exterior, devendo apresentar um valor entre 50 e 100, quando a câmara estiver refrigerada à temperatura normal de operação e na ausência de radiação incidente;
- **“RESET”** – consiste no valor da contagem do conversor analógico-digital correspondente ao nível de tensão que permanece no nó de detecção, após ter sido desconectado do nível de referência interno. Em virtude desta tensão variar aleatoriamente (origem do “reset noise”), verificam-se flutuações rápidas nos valores exibidos no écran, sendo em média 800 unidades superior ao valor REF.

Ambos os valores dependem da temperatura e quantidade de radiação luminosa incidente na superfície sensível do detector, aumentando quanto menor for a temperatura de funcionamento e maior a intensidade luminosa incidente.

A tecla “I” permite aceder à função de integração de imagem, através do écran reproduzido na figura 4.43, a partir do qual se pode controlar o tempo de exposição, escolhendo um dos valores predefinidos ou um valor específico definido no menu de opções com a tecla “T”. Em qualquer dos casos, o ciclo de integração pode ser interrompido pressionando qualquer tecla.

```

SELECT A KEY TO START INTEGRATION
1: TWO SECOND
2: FOUR SECOND
3: EIGHT SECOND
4: FIFTEEN SECOND
5: THIRTY SECOND
6: ONE MINUTE
7: TWO MINUTE
8: FOUR MINUTE
9: SIXTEEN MINUTE
T: 1.5 Seconds (T OPTION SETTING)
E: EXIT
PRESS ANY KEY TO END INTEGRATION CYCLE

19:11:53

```

Figura 4.43 – Écran da função de integração de imagem.

A tecla “M” no menu principal permite aceder a um modo de aquisição sequencial de múltiplas imagens, com o mesmo tempo de exposição, armazenadas

em ficheiros com nomes de raiz análoga e numerados sequencialmente. Conforme se pode observar no écran reproduzido na imagem 4.44, o utilizador poderá controlar o tempo de exposição comum (tecla "T" – valor definido no menu Opções), o número da imagens a adquirir sequencialmente e o intervalo de tempo entre aquisições.

```

MULTIPLE INTEGRATE AND SAVE
0-9: 0000
T: 1.5 Second Integration
N: 4 Number of Acquisitions
A: 0.0 Acquisition Interval
S: Start Acquisition
E: Exit
19:12:03

```

Figura 4.44 – Função de múltipla aquisição.

Após a integração de uma imagem (ou o carregamento em memória com a função "Get Image" – tecla "G"), esta pode ser visualizada no écran e ajustada em brilho, através da função "Display Image" – tecla "D". A figura 4.45a) reproduz o respectivo écran, sendo possível regular o brilho, tanto de modo manual (valores "H" e "L"), como automaticamente ("Auto-stretching" – tecla A). A tecla "R" permite actualizar o visionamento da imagem com as alterações efectuadas ("Redraw") e a tecla "I" traça o histograma da imagem, ou seja, o gráfico em escala logarítmica, onde nas abcissas estão representados os valores de contagem possíveis no conversor analógico-digital (ADU's) e em ordenadas o número de cada contagem que ocorre na imagem. Finalmente a tecla "D" permite efectuar a subtracção da

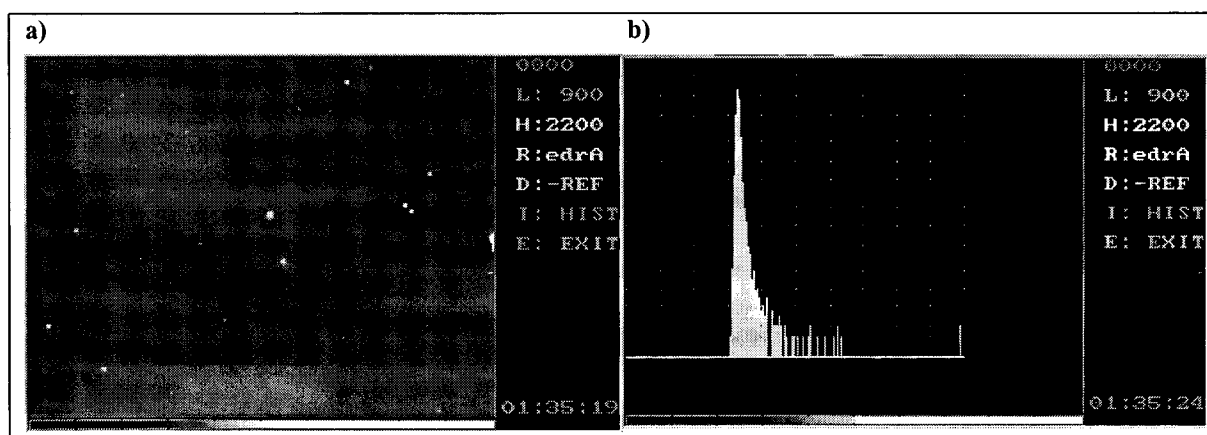


Figura 4.45 – a) Função "Display Image"; b) Histograma da imagem.

“dark frame” definida pela função “Copy as Dark Frame” – tecla C no menu principal.

Através da tecla “F” no menu principal acede-se aos modos de focagem e pesquisa de objectos (“Focus” e “Object-find” respectivamente), sendo a permuta entre os modos obtida através das teclas “F” e “O”: no primeiro modo é realizada uma transferência rápida da zona de imagem, sendo lida e mostrada no écran apenas a área central (“quarter-frame”); no segundo caso é lida toda a área de imagem, sendo os pixels posteriormente agrupados em grupos de 6x2, pelo que a imagem exibida no écran será reduzida às dimensões de um quarto da área total, permitindo maior sensibilidade por pixel o que se revela útil na localização de objectos ténues. Ambos os modos possuem submenus idênticos, como mostrado na figura 4.46, sendo efectuadas sucessivas leituras do detector e permanentemente actualizada a imagem exibida.

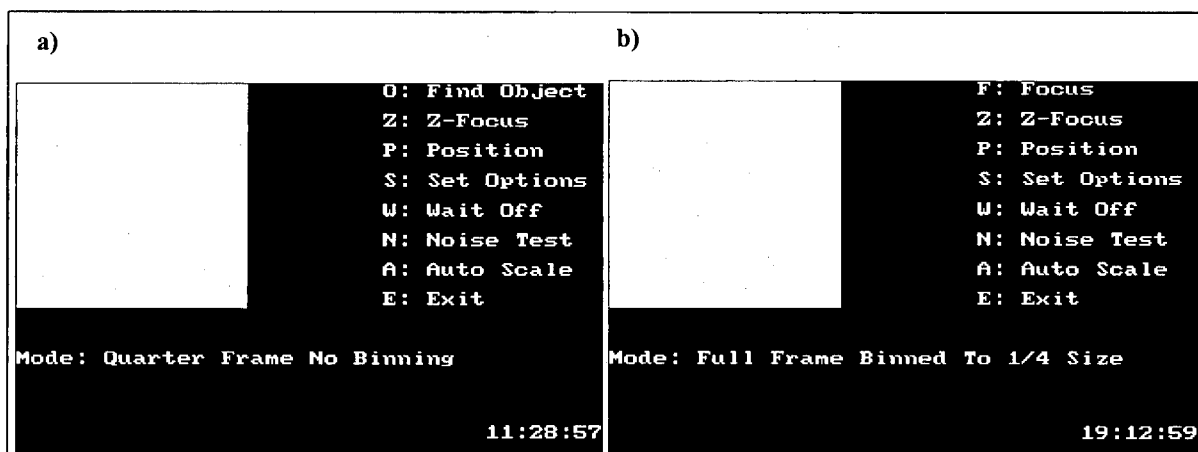


Figura 4.46 – Écrans e menus relativos aos modos de focagem, a), e pesquisa de objectos, b).

A tecla “A” - “Auto Scale” permite o ajuste automático do brilho da imagem.

A função acedida pela tecla “Z” – “Z-Focus” traça um gráfico da intensidade de radiação detectada em função da variável linear x, permitindo centrar o pico de luminosidade de uma estrela, útil em focagem ou análise de ruído.

A tecla “P” - “Position” mostra o centróide da imagem de uma estrela, possibilitando o guiamento manual de uma aquisição de longa exposição ou de múltiplas exposições para posterior adição (“Stacking”).

Em virtude de nestes modos a imagem exibida ser permanentemente actualizada, convém dispor de um comando que permita manter cada imagem o tempo suficiente para ser apreciada. A tecla “W” – “Wait On/Off” impõe, no estado “On”, um tempo de espera entre actualizações do écran de 2 segundos.

A função “N” – “Noise Test” permite realizar um teste ao funcionamento do detector. Após iniciado, o programa selecciona aleatoriamente um pixel, lendo o seu valor em sucessivas integrações, traçando posteriormente um gráfico das variações registadas.

Finalmente a função “S” – “Set Options” dispõe de um submenu reproduzido na figura 4.47, permitindo ajustar diversos parâmetros para visualização das imagens:

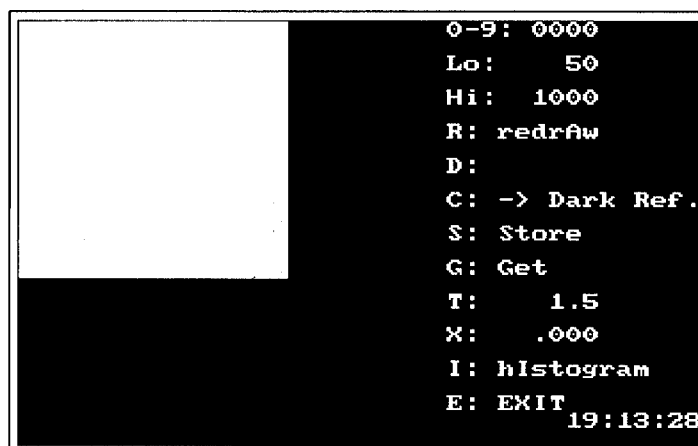


Figura 4.47 – Submenu “S – Set Options” dos modos “Focus / Find Object”.

“Lo” e “Hi” – permitem estabelecer os níveis baixo e alto do intervalo de brilho da imagem, respectivamente;

“R: Redraw” – actualiza a imagem exibida, com os parâmetros modificados;

“D: - Dark” – subtracção da “dark frame” existente no registo temporário “dark buffer”;

“C: -> Dark Ref.” – Copia uma imagem para o registo temporário “dark buffer”;

“S: Store” e “G: Get” – Armazena uma imagem em disco ou lê uma imagem do disco, respectivamente;

“T” – permite estabelecer o tempo de integração desejado;

“X” - permite estabelecer tempos de integração de 1 ms a 1s em incrementos de 1 ms;

“I” – traça o histograma da imagem.

Regressando ao menu principal, o comando “C” – “Copy as Dark Frame” permite copiar uma imagem para um registo temporário, “dark buffer”, de modo a ser

utilizada para a correcção de uma imagem adquirida por meio de subtracção (eliminação das cargas térmicas).

A função “A” – “Autoguide” permite a utilização da porta série do computador para actuação nos movimentos segundo os eixos do telescópio (Guiamento).

Os comandos “P” – “Set File Path”, “S” – “Store Image”, “X” – “Export to FITS” e “G” – “Get Image” destinam-se a operações com ficheiros, permitindo especificar o directório para ficheiros a manipular, gravar ficheiros de imagem em disco, traduzir os formatos dos ficheiros de imagem em formato FITS e carregar um ficheiro de imagem do disco para a memória, respectivamente, sendo a sua utilização intuitiva para um operador com conhecimentos básicos de MS-DOS.

Finalmente, do menu principal resta o comando “O” – “Options”, que justifica uma abordagem mais cuidada, devido à sua relevância para a operação da câmara e funcionamento do programa de controlo. Quando solicitado, exhibe o écran reproduzido na figura 4.48, permitindo a modificação dos seguintes parâmetros:

```
OPTION SETTING
0-9: 0000
T: 1.5
X: .000
I: Interrupts On
S: Many Operators
U: IUGA I C: CGA D: DTHR Night diM
B: Internal Binning
seRial; Printer port; save setUp; delay
E: EXIT, L: Comment Log
Log: 15:38:08
```

Figura 4.48 – Écran da função “O” – “Options”.

“T” (“time”) – parâmetro que estabelece o tempo de integração por defeito dos comandos “Integrate”, “Focus”, “Object Find” e “Z-Focus”, sendo o valor pretendido dado por quatro dígitos, em décimos de segundo (desde 0,1s a 999,9s);

“X” (“X-Timing”) – permite tirar partido das capacidades de obturação electrónica da área de memória do detector, possibilitando tempos de exposição desde 1ms a 1s em incrementos de 1ms;

“I” (“Interrupts On/Off”) – quando “OFF” inibe as interrupções do relógio de tempo real do processador do computador, durante as operações de leitura do

detector, a fim de evitar eventuais não-uniformidades na comunicação através da porta paralela;

“S” (“Self/Many Operators”) – na posição “SELF” gera um atraso de 15s entre a ordem de integração de imagem e o início da sua execução, permitindo ao operador preparar-se para a realização de guiamento manual;

“V”, “C”, “D”, “N” e “M” (Modos vídeo) – permitem seleccionar o modo vídeo do monitor do computador: VGA, CGA ou DTHR, sendo os dois últimos actualmente obsoletos, pelo que se usa sempre o modo VGA); O modo “N-Night” utiliza cores próprias para visão nocturna, enquanto o modo “D-diM” reduz a intensidade de luz emitida pelo monitor;

“B” (“Binning”) – Selecciona o tipo de “binning” usado na leitura do detector, de quatro possíveis:

“Internal binning” – é o modo por defeito e consiste na adição da carga de três pixels horizontais adjacentes, no registo série horizontal do detector, produzindo imagens de dimensão 252x242 pixels e proporciona maior sensibilidade por pixel, mas menor resolução de imagem que o modo “378Wide” e menor capacidade dos poço de potencial (“well depth”) que os modos externos;

“External binning” - consiste na adição das contagens referentes a três pixels horizontais adjacentes na memória do computador, produzindo imagens de dimensão 252x242 pixels e proporciona maior intervalo dinâmico de variação da contagem por pixel que o modo interno, por não estar sujeito à saturação de carga dos poços de potencial do registo série horizontal;

“Internal/DbISamp” – idêntico ao primeiro, mas permite reduzir eventuais ruídos de baixa frequência resultantes da rede de 50 Hz ou de malhas de terra, através da realização pelo computador de uma dupla amostragem do nível de referência e do sinal;

“External 378Wide” – Consiste na adição das contagens referentes a dois pixels horizontais adjacentes na memória do computador, produzindo imagens de dimensão 378x242 pixels e proporcionando imagens com melhor resolução que os modos de 252 pixels de largura mas menor sensibilidade;

“R” (“seRial”) e “P” (“Paralel port”) – permitem estabelecer os parâmetros de comunicação do porto série e o endereço de porto paralelo, respectivamente;

“Y” (“delaY”) – permite ajustar os tempos de atraso dos “clocks” do CCD para compatibilização entre o computador, o conversor analógico-digital e os amplificadores operacionais da placa de pré-amplificação;

“U” (“save setUp”) – guarda os parâmetros de configuração no ficheiro “SETAP2.DAT”;

“L” (“comment Log”) – inclui texto nos ficheiros de imagem a gravar.

4.1.8. Ajustes Finais:

Realizada a integração completa do sistema é necessário proceder a regulações indispensáveis ao seu correcto funcionamento e testar a eficácia do sistema de refrigeração, bem como a fiabilidade de todo o equipamento.

Conforme referido na secção anterior, o nível de referência "REF" representa o valor da contagem no conversor analógico-digital quando o nó de detecção do andar de saída estiver comutado para o nível de tensão de referência interno do detector, "offset level", valor que se pretenderá subtrair ao sinal vídeo de saída, de modo a aproveitar toda a variação dinâmica de entrada do conversor analógico-digital. O potenciómetro P1, existente na placa de pré-amplificação, permite ajustar a tensão a subtrair do sinal vídeo de modo a anular o nível de "offset level". Para realizar essa regulação, monta-se todo o sistema, tapando-se a entrada de luz de modo ao detector não ser atingido por nenhuma radiação. Liga-se apenas a fonte de alimentação de $\pm 15\text{VDC}$, não ligando, por enquanto, a alimentação do sistema de refrigeração. No canto superior direito do écran do menu principal do programa de controlo aparece o valor de "REF" a oscilar rapidamente. Após esperar o tempo suficiente para a electrónica atingir uma temperatura de funcionamento estável, verifica-se que o valor de "REF" oscila mais lentamente, tendendo a estabilizar. É, então, possível regular a posição do cursor do potenciómetro P1 de modo aquele valor estabilizar entre 50 e 100. O outro parâmetro que aparece no écran, "RESET", corresponde à contagem do conversor analógico-digital respeitante ao nível de tensão que permanece no nó de detecção, após ter sido desconectado do nível de referência interno, e deverá ser superior por 600 a 800 unidades ao valor de "REF" (na realidade, após a desconexão o valor de tensão na saída diminui, mas o amplificador a jusante é inversor). Porém a regulação realizada não é definitiva, em virtude dos valores referidos variarem fortemente com a temperatura do "chip", devendo ser afinada sempre que for alterada a temperatura de funcionamento do detector, por actuação na tensão de alimentação do módulo de Peltier.

Existe ainda a necessidade de se proceder a uma segunda regulação, dependente da velocidade do computador utilizado, de modo a gerar os intervalos de tempo necessários para a correcta leitura do sinal de saída do detector: O amplificador do sinal vídeo de saída necessita de $5\mu\text{s}$ para atingir um nível estável

na saída, após alteração do sinal na entrada; são necessários $10\mu\text{s}$ para o conversor analógico-digital proceder à digitalização do sinal analógico. Os tempos de atraso requeridos são gerados pelo programa de controlo, por meio de “loops” de “software”, cujo tempo de execução depende da frequência de relógio de cada computador. Deste modo é necessário realizar ensaios até acertar o valor das variáveis de controlo dos referidos “loops” e guardá-los no ficheiro “SETAP.DAT”.

Esta regulação é definitiva para cada computador que comande a câmara e processa-se do seguinte modo: são integradas várias imagens escuras de teste, avaliadas e ajustados os valores por tentativa e erro; para tal, a partir do menu “FOCUS/FIND” (tecla F no menu principal) em modo de focagem, entra-se no submenu “SET OPTIONS” para seleccionar um tempo de exposição de 0,5 segundos (sequência de teclas “0 0 0 5 T”) e os níveis limiares para exibição de imagem de 0 a 4095 (sequência de teclas “0 0 0 0 L 4 0 9 5 H”); retornando ao écran de “FOCUS” aprecia-se a imagem exibida, que deverá ter um aspecto idêntico ao exemplificado na figura 4.49 c); caso apareçam listas verticais na imagem, como na figura 4.49 a) é sinal de temporização insuficiente, havendo a necessidade de alterar os valores de “DELAY” (tecla Y) no menu “OPTIONS” do écran principal; a situação mostrada em b) corresponde a valores de “delay” próximos dos valores mínimos necessários; é conveniente determinar o valor a partir do qual a imagem deixa de apresentar listas verticais, fixando o ajuste final em cerca de 25% acima desse valor, que será definitivamente gravado, através de “SAVE SETUP” (tecla U) do menu “OPTIONS”, no ficheiro “SETAP.DAT”. Contudo, para os actuais computadores rápidos, o valor máximo disponível dos parâmetros de “delay”, 99, revela-se insuficiente, sendo necessário introduzir “00”, correspondente a 255, já suficiente.

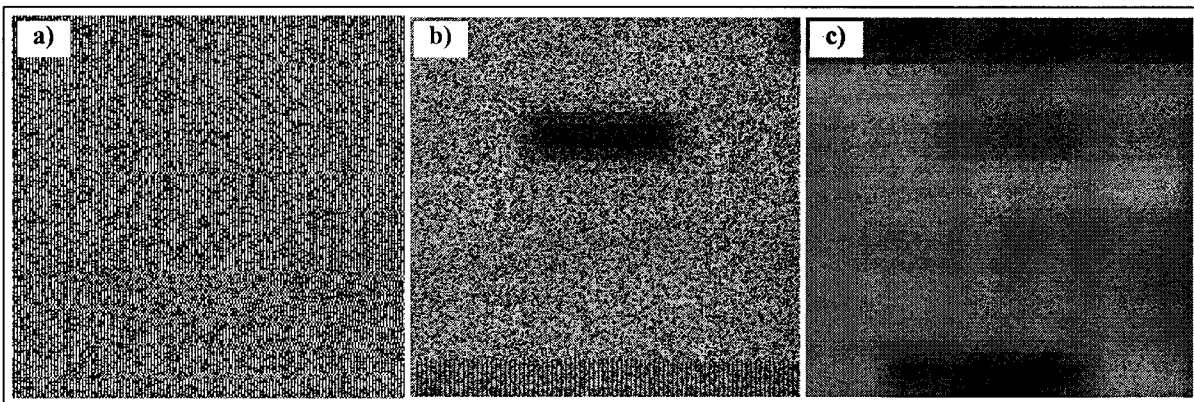


Figura 4.49 – Processo de afinação experimental dos tempos de “delay” necessários. a) imagem com riscas verticais denunciando valores insuficientes de “delay”; b) situação intermédia, com valores perto do mínimo exigido; c) ajuste correcto

O teste á eficácia do sistema de refrigeração pode ser realizado ligando a respectiva fonte de alimentação e aumentando gradualmente a tensão aplicada ao módulo de Peltier por saltos de cerca de 2 Volts. Para tensões aplicadas sucessivamente mais elevadas, verifica-se que o valor do pãmetro “REF” tem tendência a aumentar. Convém esperar que esse valor estabilize antes de aumentar novamente a tensão do módulo de Peltier, assegurando um arrefecimento gradual do “chip” detector.

Se para cada valor de tensão do módulo de Peltier forem integradas várias imagens escuras com diferentes tempos de integração, é possível ter uma noção quantitativa da eficácia do sistema de refrigeração. Para tal, há que recorrer a “software” de tratamento de imagem, adiante referido, a fim de determinar o valor médio dos pixels das imagens. Realizado o ensaio, cujos resultados se encontram compilados na figura A1.1 do Apêndice I, verificou-se que o valor médio dos pixels cresceu a um ritmo de cerca de 310 unidades (ADU) por segundo de exposição à temperatura ambiente (sistema de refrigeração não activado), atingido-se a saturação das imagens por “dark current” com tempos de integração inferiores a 60 segundos. Após ligado o sistema de refrigeração, fixou-se a tensão do módulo de Peltier em 2 Volts, esperou-se o tempo suficiente para que se atingisse o equilíbrio térmico e regulou-se o valor de “REF”, como anteriormente descrito. Nesta situação verificou-se que o ritmo de crescimento do valor médio dos pixels de imagens escuras tinha diminuído para apenas 38 unidades ADU por segundo de exposição, sendo possível realizar integrações de 1 minuto sem atingir a saturação. Repetindo o processo para uma tensão do módulo de Peltier de 6 Volts, concluiu-se que o ritmo de crescimento tinha diminuído para cerca de 4 unidades ADU por segundo de exposição, sendo possível realizar integrações de 3 minutos e obter imagens longe da situação de saturação.

Resta testar a fiabilidade do sistema e, devido ao facto de a probabilidade de avarias em sistemas electrónicos ser maior durante as primeiras horas de funcionamento, o que usualmente se designa por “mortalidade infantil”, o melhor teste que se pode realizar, consiste em deixar o equipamento em funcionamento permanente por um período de tempo suficiente, digamos 4 horas, de modo a ultrapassar o período crítico.

4.2. ADAPTAÇÃO DE UMA CÂMARA DE VIDEOCONFERÊNCIA (“CONNECTRIX QUICKCAM”) A APLICAÇÕES ASTRONÓMICAS

Com o advento da “Internet” popularizaram-se várias aplicações destinadas à troca de mensagens escritas entre vários utilizadores em tempo real (“Internet Relay Chat”). Aproveitando as capacidades multimédia dos actuais computadores pessoais, estes canais de comunicação em tempo real evoluíram rapidamente, possibilitando a comunicação áudio através da rede. Com o aumento da velocidade dos computadores e modems, e a maior largura de banda disponibilizada para comunicações de dados tornou-se possível implementar aplicações de videoconferência, que consistem basicamente na troca de som e imagem em tempo real. Tal é conseguido com computadores dotados de placas de som, microfone e pequenas câmaras de vídeo digital, capazes de captar e transmitir através da rede imagens sucessivas dos locais em comunicação.

Contudo, devido às larguras de banda e velocidades disponíveis nas linhas telefónicas usualmente utilizadas, a difusão de vídeo na rede encontra-se limitada a imagens (“frames”) de reduzidas dimensões, digitalizadas com poucos bits e baixo número de imagens por segundo (“frame rate”).

Vários fabricantes conceberam e comercializaram câmaras de vídeo digitais, satisfazendo tais requisitos, baseadas em detectores CCD de reduzidas dimensões e rápidos conversores analógico-digitais de 6 a 8 bits.

Uma das primeiras dessas câmaras a ser comercializada, a “QuickCam” fabricada pela “Connectrix Corporation” (posteriormente anexada pela “Logitech”), encontra-se reproduzida na figura 4.50 e utiliza um “chip” detector TC255 (“Texas Instruments”) e um conversor analógico-digital de 6 bits, permitindo obter imagens digitalizadas de 320(H)x240(V) pixels com 64 níveis de cinzento.

Embora estas características não sejam as ideais para a aquisição de imagens astronómicas, nomeadamente a baixa qualidade de quantificação e codificação do sinal, vários entusiastas amadores da astrofotografia digital propuseram-se adaptá-la a um telescópio, aproveitando o detector CCD, electrónica e “software” de controlo, constituindo um sistema detector de muito baixo custo e de fácil implementação.

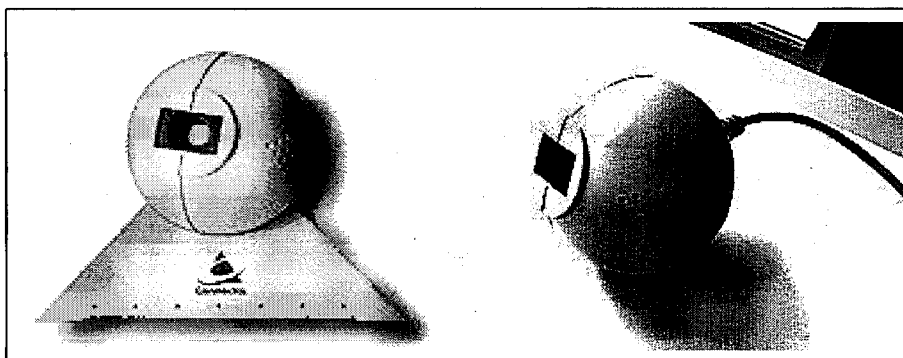


Figura 4.50 – Câmara de vídeo “QuickCam” fabricada por “Connectrix Co.”

Na realidade, embora de qualidade limitada e sem rigor suficiente para aplicações fotométricas, uma câmara CCD assim construída permite concretizar algumas aplicações de astrofotografia digital (planetária, pelo menos), com interesse didáctico e de divulgação tecnológica, constituindo um bom sistema de treino para iniciação às técnicas de observação e operação comuns a qualquer sistema de aquisição de imagem.

Por outro lado, tal projecto revela-se facilmente exequível em ambiente escolar, quer pelo seu reduzido custo (câmaras comercializadas a preços rondando os 20.000\$), quer pela facilidade de implementação, como será discutido na presente secção, permitindo obter rapidamente um detector CCD operacional, suficiente para actividades de demonstração dos aspectos técnicos relativos à aquisição e processamento de imagens astronómicas digitais.

4.2.1. O Detector CCD TC255:

A câmara "QuickCam" utiliza como elemento detector CCD o circuito integrado TC255P, fabricado pela "Texas Instruments", representado na figura 4.51, conjuntamente com o respectivo "pin-out". Consiste num dispositivo do tipo "frame transfer", com uma área de imagem organizada numa matriz de 336(H) x 243(V) fotoelementos de geometria quadrangular com 10 μ m de lado.

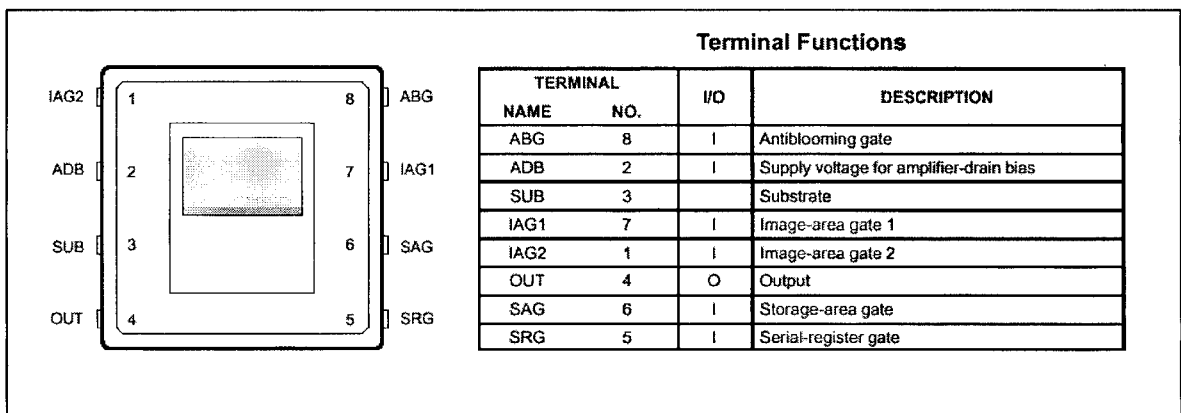


Figura 4.51 - Disposição de terminais e respectivo "pin-out" do "chip" detector CCD Texas Instruments TC255P, que equipa a câmara "QuickCam" [Ref. 10].

Após o tempo de integração, os pacotes de cargas, gerados nos fotoelementos expostos à radiação da área de imagem, são transferidos para a área de memória a um ritmo que pode atingir 80ns / linha, permitindo completar a transferência em cerca de 20 μ s, conferindo ao detector uma capacidade de transferência de alta velocidade e possibilitando realizar uma função de obturador electrónico, comparável aos dispositivos com transferências do tipo "interline transfer", sem a perda de sensibilidade e resolução inerentes a essa tecnologia.

O mecanismo de transferência de carga baseia-se na tecnologia de fase virtual, comum nos detectores CCD fabricados pela "Texas Instruments" e idêntico ao discutido para o detector TC245 na secção 4.1.2..

A detecção de carga é realizada num andar de saída de configuração simples com estrutura análoga ao descrito na secção 2.3., obtendo-se um factor de conversão carga – tensão típico de 12 μ V/e⁻.

Na figura 4.52 apresentam-se os diagramas de blocos funcional e de topologia do detector TC255P.

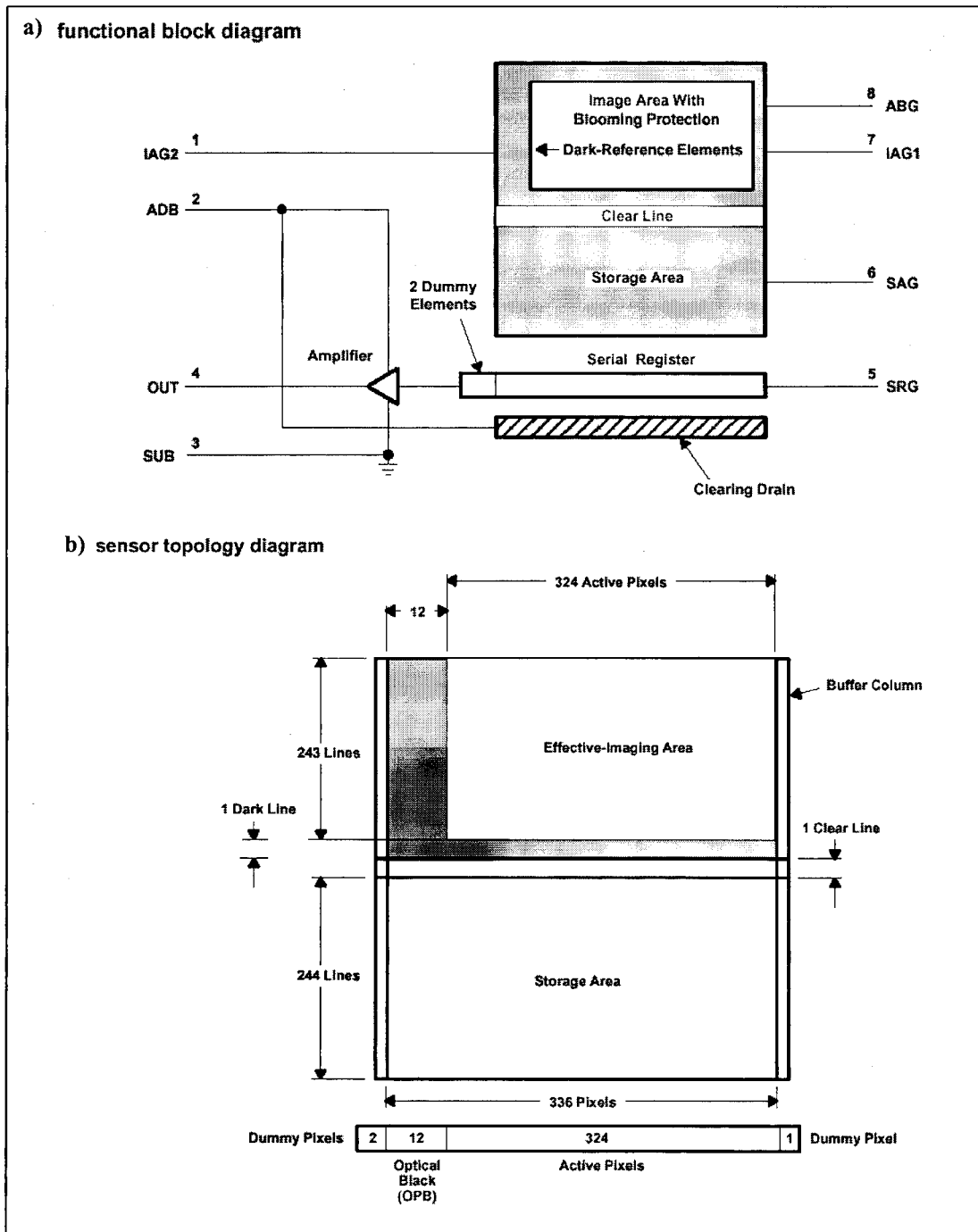


Figura 4.52 - Diagrama de blocos funcional (a) e diagrama de topologia (b) do sensor TC255P [Ref. 10].

Como se pode verificar, existe um conjunto de 12 fotoelementos à esquerda de cada linha da área de imagem, cobertos por uma máscara opaca, destinados a gerarem uma referência de “dark current”, que poderá ser utilizada por eventuais circuitos subseqüentes de processamento de vídeo para restauração do nível preto do sinal de vídeo. Com idêntico objectivo, existe ainda uma coluna à direita da área de imagem e uma linha no fim dessa área.

Entre as áreas de imagem e de memória foi criada uma linha reservada à limpeza da área de imagem (“Clear Line”), no início de uma integração ou em operações de obturador electrónico, permitindo a limpeza de cargas da área de imagem sem ser necessário a sua transferência para a área de memória.

Cada fotoelemento é protegido contra os efeitos da saturação por “anti-blooming gate” que quando activada provoca a recombinação do excesso de carga com cargas de sinal contrário no substrato.

Em virtude de no presente projecto se utilizar a electrónica e “software” de controlo implementados para o funcionamento do detector na câmara comercial “QuickCam”, não é necessário estudar pormenorizadamente os respectivos diagramas temporais. Contudo, como referência e para efeitos de comparação, apresentam-se na figura 4.53 as sequências de sinais de “clock” necessários à execução da transferência da área de imagem para a área de memória e da transferência de uma linha da área de memória para leitura por deslocamento no registo série horizontal.

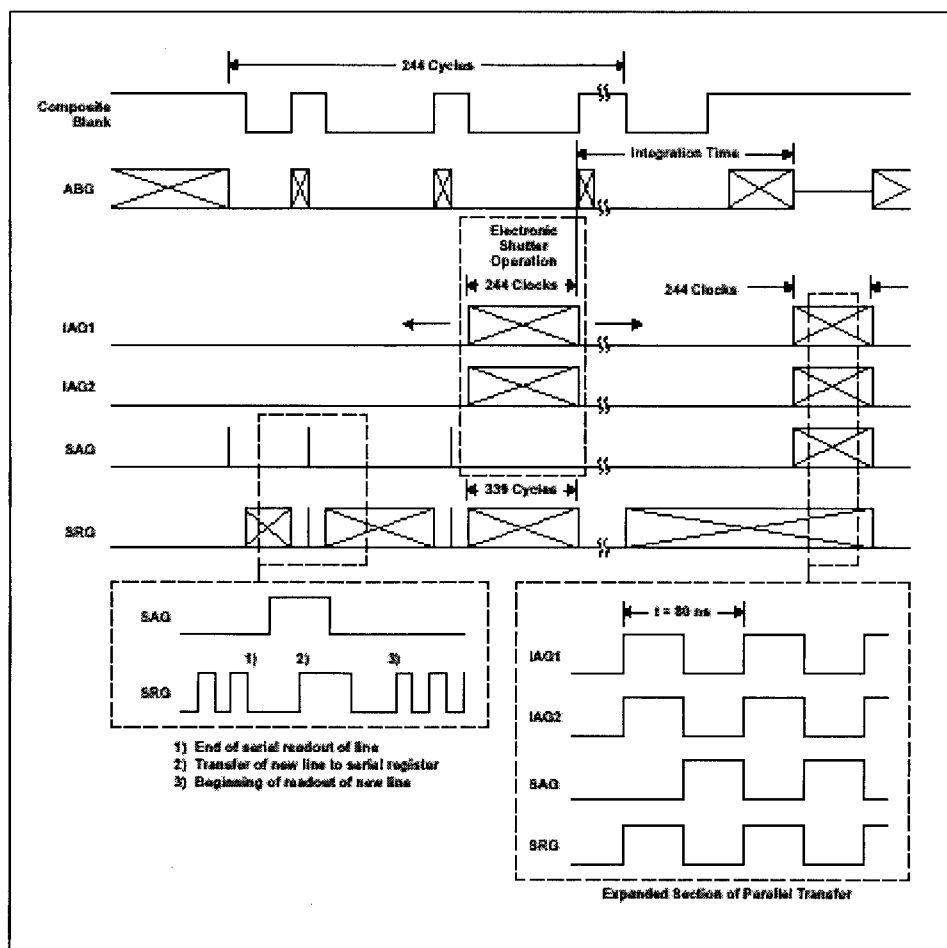


Figura 4.53 – Diagramas temporais para o detector TC255P, conforme são apresentados pelo fabricante [Ref. 10].

4.2.2. Desmontagem da Câmara “Connectrix QuickCam”

De modo a adaptar a câmara “QuickCam” a um telescópio, para aquisição de imagem astronómica, é necessário desmontar a caixa plástica esférica, onde se encontra instalado o “chip” detector, montado sobre uma placa de circuito impresso, e retirar o sistema óptico que lhe está sobreposto, destinado à focagem de imagens de cenas iluminadas comuns.

Para a realização dessa operação recorreu-se a um artigo publicado na Internet, [Ref. 32], que constitui um guia ilustrado passo a passo da desmontagem, e que em seguida se reproduz. Convém, antes, notar que a câmara “QuickCam” foi desenhada para ser aberta apenas por serviços técnicos autorizados, pelo que a desmontagem implica a perda imediata de quaisquer direitos de garantia, decorrendo por conta e risco do executante.

A abertura da caixa plástica esférica sem a danificar, consegue-se introduzindo um arame metálico (por exemplo, um “clips” desdoblado) num pequeno orifício lateral existente sobre a junção das duas peças que formam a caixa, conforme se mostra na figura 4.54 a), empurrando ligeiramente uma pequena patilha plástica de encaixe, até se ouvir um “click” típico de destravamento. Existem ainda mais duas patilhas de encaixe que se podem destravar, separando cuidadosamente as duas peças plásticas, por meio de uma chave de fendas de relojoeiro inserida na junta mostrada na figura 4.54 b), havendo o cuidado de não forçar em demasia a frágil peça plástica de cor preta onde estão alojadas as lentes. A figura 4.54 c) exhibe uma das peças plásticas após a separação, permitindo localizar as três patilhas de encaixe.

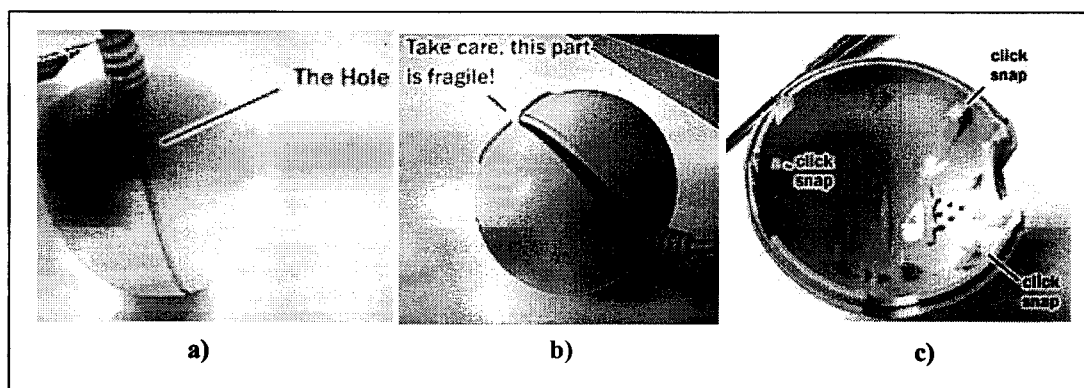


Figura 4.54 – Pormenores da desmontagem da caixa plástica da câmara “QuickCam” onde se encontra alojado o “chip” detector CCD. [Ref. 14].

Após a separação das peças que formam a caixa exterior, retira-se a peça plástica de cor preta que protege as lentes, mostrada na figura 4.55 a), e que se encontra encaixada naquelas peças. É agora possível ver o interior da câmara, conforme se mostra na figura 4.55 b), com o sistema óptico montado sobre uma placa de circuito impresso, fixado entre pequenas ranhuras existentes no interior das peças plásticas que constituem o corpo da câmara. É conveniente tomar precauções anti-estáticas antes de tocar no circuito impresso, estabelecendo uma ligação à terra por meio de uma pulseira própria para o efeito. Separado o miolo da metade da caixa onde permanece encaixado, apresenta o aspecto da figura 4.55 c), onde se identificam os componentes que permitem remover o sistema óptico.

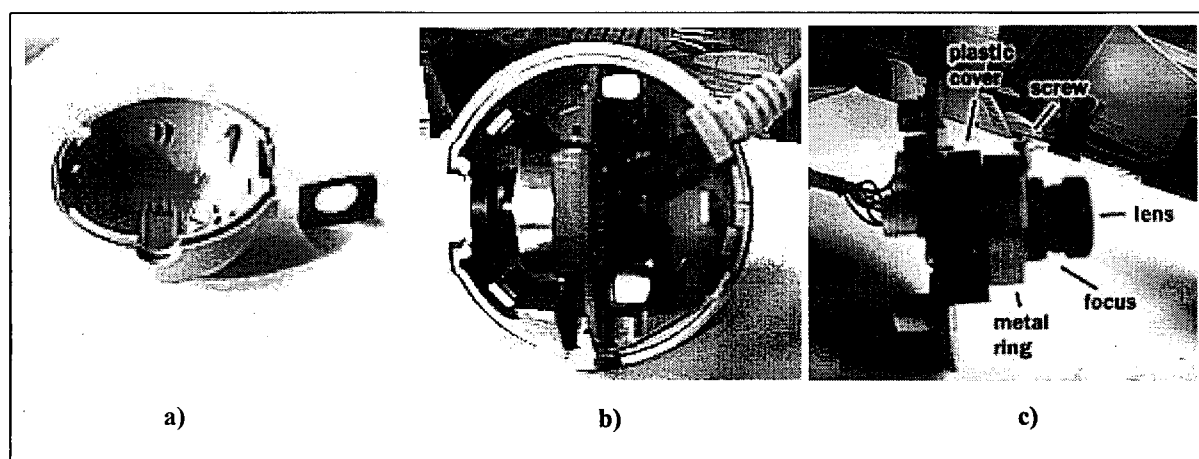


Figura 4.55 – Pormenores da separação do miolo da câmara da sua caixa exterior, e identificação dos componentes do sistema óptico. [Ref. 14].

O parafuso existente junto ao anel metálico, prende o sistema de lentes na posição de focagem de fábrica, para objectos distanciados de 1 a 2 metros, sendo possível refocar a câmara para objectos muito próximos, por exemplo, afrouxando o parafuso e rodando as lentes. Contudo para a aplicação que se pretende implementar é necessário remover todo o sistema óptico. Para tal, desaperta-se completamente o parafuso referido e desenrosca-se o corpo que suporta as lentes da cobertura plástica. Em seguida retira-se o anel metálico, obtendo-se a situação representada na figura 4.56 a).

A cobertura plástica contém no seu interior uma pequena lâmina circular de cor azulada que constitui um filtro de infravermelhos, sendo necessário retirá-lo para utilizar o detector em aplicações de captação de fraca intensidade de radiação luminosa (visão nocturna). No entanto sugere-se que seja guardado, a fim de poder

voltar a ser montado, para o caso de se pretender realizar imagens do Sol (sendo obrigatório utilizar cumulativamente um filtro de boa qualidade específico para observação solar na objectiva do telescópio) ou da Lua cheia, pois evita a saturação do detector quando exposto a radiação de elevada intensidade, em virtude da sua eficiência quântica apresentar um máximo na região entre os 700 e 800 nm. Para remover o filtro de infravermelhos é necessário desmontar a cobertura plástica que se encontra fixa à placa de circuito impresso por dois pequenos parafusos, descolando o filtro cuidadosamente do seu interior. Na figura 4.56 b) mostram-se as peças retiradas do sistema e na figura 4.56 c) o que resta, com o “chip” detector descoberto em evidência.

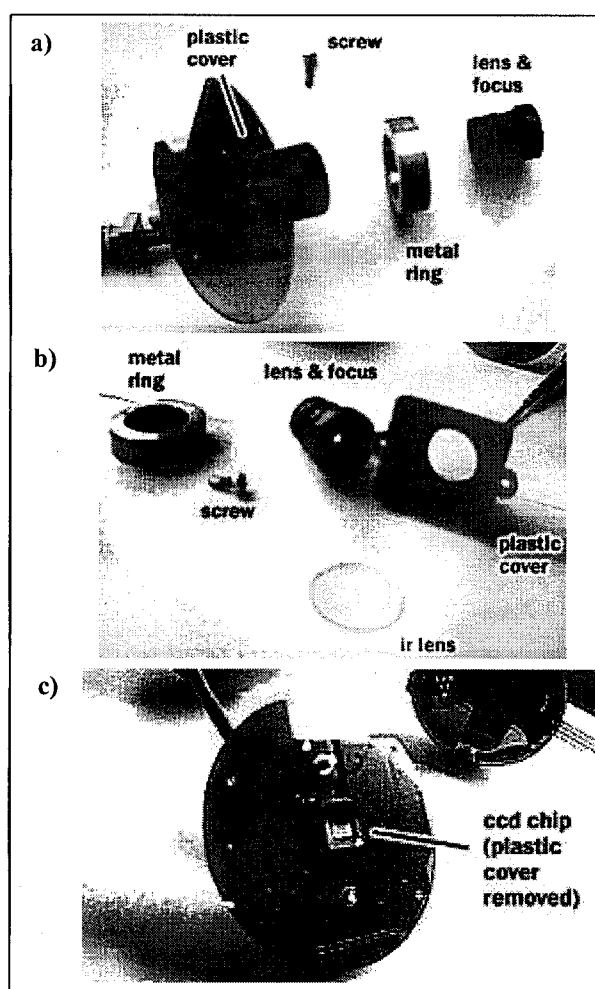


Figura 4.56 – Aspectos da desmontagem do sistema óptico da câmara “QuickCam”, até se conseguir isolar o detector CCD, montado sobre a placa de circuito impresso. [Ref. 14].

O procedimento de desmontagem fica assim concluído, podendo-se voltar a montar a cobertura plástica (com o filtro retirado).

4.2.3. Adaptação ao Telescópio:

A adaptação da câmara "Quickcam" ao telescópio realiza-se montando a placa de circuito impresso, retirada do invólucro plástico original, numa caixa de protecção improvisada, na qual se cria uma abertura de tamanho suficiente para iluminação da superfície sensível do detector. Para conseguir o direccionamento correcto da radiação luminosa e o acoplamento mecânico da câmara no porta-oculares do telescópio utiliza-se um tubo de ocular de 1-1/4 polegadas, que se mandou executar, segundo o desenho esquemático da figura 4.57, numa oficina de serralharia. A fim de evitar reflexões de luz nas paredes interiores da peça, estas foram posteriormente pintadas com tinta preta baça.

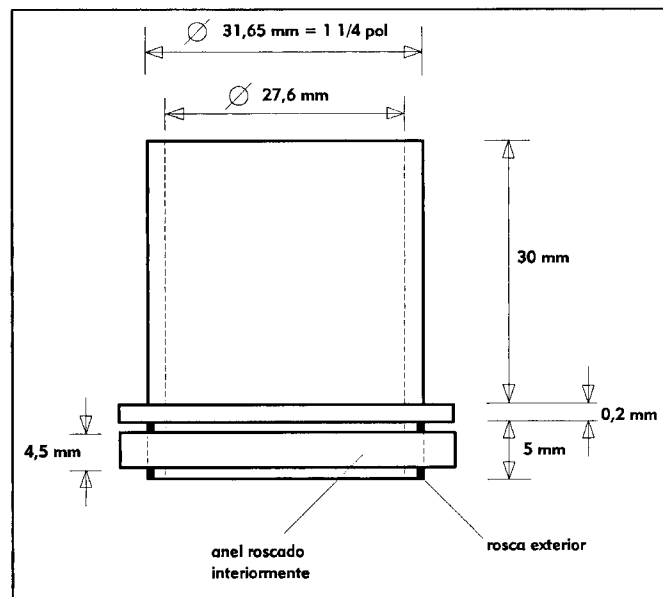


Figura 4.57 – Tubo de ocular de adaptação ao porta-oculares de telescópio.

A caixa de protecção e acondicionamento da placa electrónica com o "chip" detector foi improvisada a partir de uma caixa plástica de canalização eléctrica (cilíndrica, com \varnothing de 63,5 mm e altura de 38 mm), na qual foi furada uma abertura circular de modo à base do tubo de ocular poder penetrar. Para permitir a fixação da montagem por meio de parafusos, cortou-se uma chapa de alumínio de 1,5 mm de espessura em forma quadrada com 61 mm de lado. A inserção justa da cobertura plástica do detector CCD (ver figura 4.56) no tubo de ocular foi conseguida limando ligeiramente as suas arestas. Finalmente, a estabilidade e isolamento eléctrico da

montagem da placa de circuito impresso, foi obtida colando à volta da cobertura plástica do CCD sucessivas camadas de fita de espuma autocolante (tipo Tesa®) até preencher o desnível existente entre a placa e o tubo da ocular. A figura 4.58 mostra um corte da montagem final de modo a ilustrar o procedimento descrito.

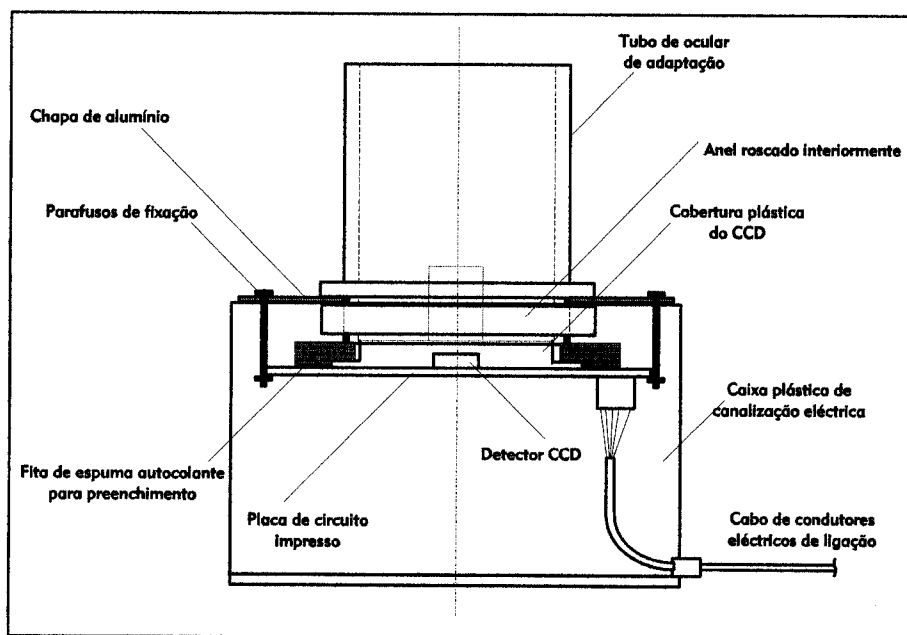


Figura 4.58 – Corte da montagem final de adaptação da câmara “QuickCam” ao porta-oculares de um telescópio.

Na figura 4.59 reproduzem-se fotografias da montagem final em vistas diferenciadas, permitindo observar alguns dos aspectos construtivos mencionados e na figura 4.60 apresenta-se a câmara modificada e pronta para operação num telescópio, conjuntamente com as peças retiradas do sistema inicial.

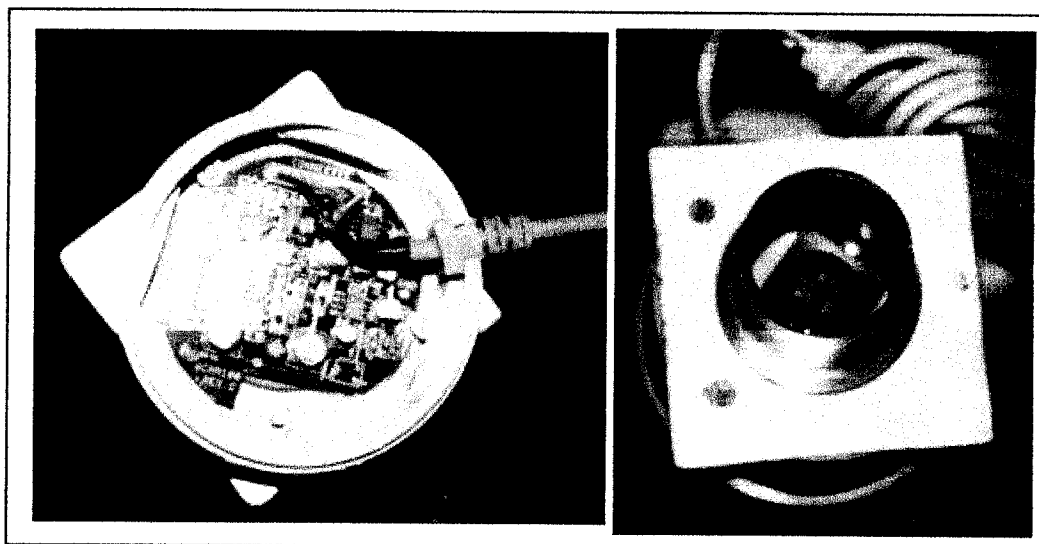


Figura 4.59 – Vistas de planos diferentes da adaptação efectuada, permitindo observar alguns aspectos construtivos referidos no texto.

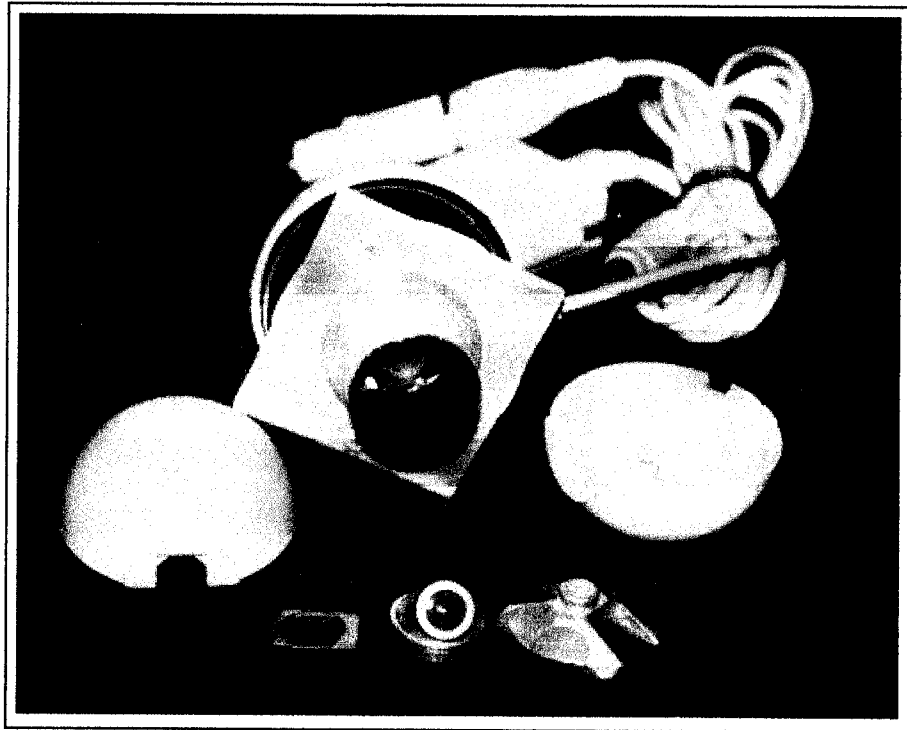


Figura 4.60 – Aspecto final da câmara adaptada e peças originais retiradas.

4.2.4. Comunicação com o Computador e “Software” de Controlo:

Realizadas as modificações necessárias à adaptação a um telescópio, resta ligar a câmara a um computador e executar o programa de controlo fornecido para obter imagens. Contudo, interessa focar alguns aspectos relevantes da comunicação câmara – computador e opções do programa de controlo.

A comunicação entre a câmara “QuickCam” e o computador realiza-se através da porta paralela, usualmente destinada a uma impressora. Para tal, o cabo de condutores de ligação, que sai da placa de circuito impresso onde se encontra instalado o detector (ver figuras 4.58 e 4.59), é terminado por uma ficha macho tipo D de 25 pinos. Esta ficha, embora de dimensões pouco maiores que as usuais, não é passiva, isto é, contém no seu interior diversos componentes electrónicos, nomeadamente o conversor analógico-digital e a interface de comunicação com a porta paralela, pelo que deverá ser considerada parte integrante da câmara. Por outro lado, conjuntamente com o cabo referido, sai da ficha um outro cabo, de menor secção, que termina em duas fichas, uma tipo DIN de 5 pinos fêmea comum em

teclados e outra tipo PS/2 macho normal em ratos. Este segundo cabo destina-se a absorver a tensão de alimentação de +5 V DC, necessária ao funcionamento da electrónica da câmara e do detector, através de uma porta de ligação a um teclado ou a um rato.

Em virtude destes aspectos, a distância máxima entre a câmara e o computador, está limitada ao comprimento do cabo de origem (1,5 metros), o que se pode revelar insuficiente em algumas instalações de observação. Sendo necessário ultrapassar esta limitação, o cabo de comando da câmara pode ser aumentado por um cabo de extensão paralelo com terminações em fichas D de 25 pinos macho e fêmea e a ligação de alimentação substituída por um conjunto de 4 baterias de níquel – cádmio recarregáveis, tamanho AA, ligadas em série ($4 \times 1,2V = 4,8V \approx 5V$ pretendidos), correctamente ligadas a uma das fichas do cabo disponível, como pormenorizadamente descrito em [Ref. 33].

Segundo o fabricante da câmara “QuickCam”, as características do computador indicado para o seu comando, são as seguintes:

- PC com processador 486DX2 - 50 MHz, ou melhor;
- 8 Mbytes de RAM, mínimo;
- Disco rígido com pelo menos 10 Mbytes disponíveis;
- Écran VGA ou SVGA e placa de vídeo com pelo menos 256 níveis de cor, sendo recomendado 65.000 níveis;
- Sistema operativo “Windows 3.1” ou “Windows for Workgroups 3.11” ou “Windows 95”.

Caso se opte pela utilização do cabo de alimentação original não é necessário dispor de uma saída PS/2 ou de teclado DIN suplementar, porque o próprio cabo realiza a derivação, permitindo efectuar a ligação dos dois dispositivos na mesma saída (alimentação da câmara e teclado ou rato).

Quanto ao “software” de comando, são incluídos no pacote comercial da câmara “QuickCam” dois programas:

- “QuickPict”, destinado à captação de imagem simples, possibilitando o pré-visualização em tempo real do objecto a fotografar;
- “QuickMovie”, destinado à captação de “clips” de vídeo em formato “.AVI”.

O actual representante destas câmaras (“Logitech”) disponibiliza no seu “site” da Internet [Ref.25] actualizações gratuitas dos programas originais.

Para aplicações em astrofotografia apenas interessa considerar o primeiro programa, do qual, em seguida, se irão discutir os comandos relevantes à operação na aplicação considerada.

O programa “QuickPict” apresenta uma interface com o utilizador, simples e intuitiva, que lhe permite visionar no écran o objecto a adquirir e modificar os parâmetros da imagem, em tempo real, antes de ordenar a sua integração, através da janela que se reproduz na figura 4.61.

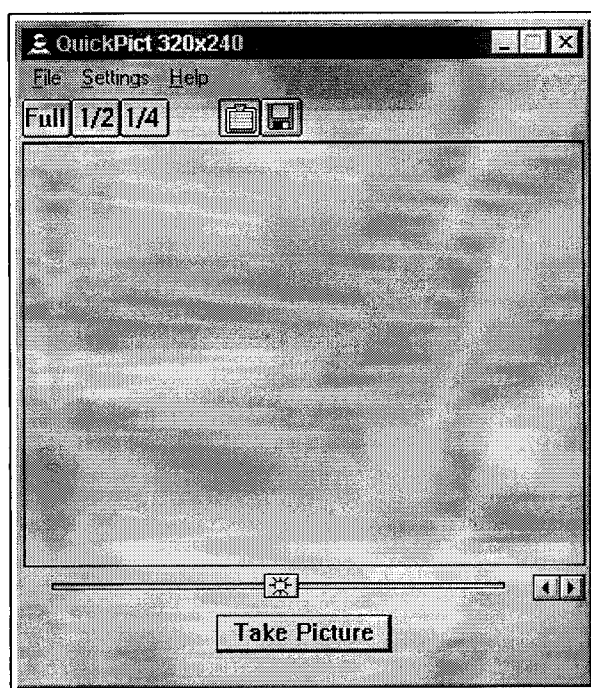


Figura 4.61 – Écran do programa “QuickPict”, onde se pode pré-visionar a imagem a adquirir.

A zona central do écran está reservada ao pré-visionamento da imagem a adquirir, sendo a integração iniciada por actuação no botão “Take Picture”. O comando deslizante, abaixo da zona de imagem, destina-se a regular o brilho da imagem e corresponde ao tempo de exposição: deslocando-o para a esquerda, reduz-se o brilho da imagem através de uma exposição mais rápida; contrariamente, para a direita, aumenta-se o tempo de exposição e, em consequência, o brilho.

O menu “Settings” permite aceder a duas janelas destinadas à regulação de vários parâmetros relacionados com o tamanho e qualidade da imagem e ajustes da câmara, que se reproduzem na figura 4.62.

No primeiro, “Image Size and Quality” é possível escolher a quantidade de bits utilizados na digitalização, ou quatro a que correspondem 16 níveis de

cinzentos, sem interesse na aplicação pretendida, ou seis, correspondentes a 64 níveis.

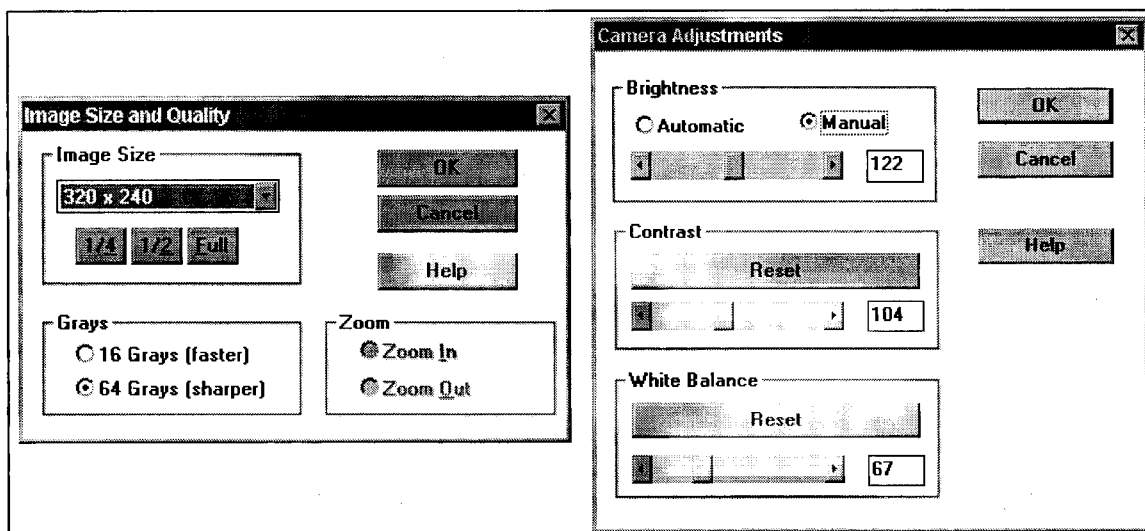


Figura 4.62 – Parâmetros de imagem e ajustes da câmara controláveis por “software”.

A dimensão das imagens a adquirir é também aqui seleccionável, entre três formatos diferentes: “Full Frame”: 320(H) x 240(V) pixels; “1/2 Frame”: 160(H) x 120(V) pixels; “1/4 Frame”: 80(H) x 60(V) pixels.

Na realidade, o que aqui se está a seleccionar é o tipo de “binning” utilizado, 1x1, 2x2 e 4x4, como se pretende mostrar na figura 4.63, onde a imagem do mesmo alvo (grade de uma varanda distante) foi adquirida, com igual tempo de exposição, nos três formatos, permitindo observar que o campo visual é idêntico (totalidade da área sensível do detector utilizada) e que a imagem é tanto mais clara quanto menor (mais fotoelementos a integrar carga por pixel de imagem final).



Figura 4.63 – Imagem obtida nos três formatos diferentes, evidenciando o recurso a “binning”.

A segunda janela da figura 4.62 – “Camera Adjustments” permite optar entre uma regulação automática do brilho / tempo de exposição, com a qual o programa efectua automaticamente a regulação baseando-se na totalidade de luz recebida, ou manual, onde a regulação é realizada pelo utilizador, situação mais apropriada para a aplicação em questão. O botão deslizante, duplica o existente no écran principal, mostrando a caixa ao lado o valor fixado (escala de 0 a 254, adimensional) para referência.

O controlo de Contraste revela-se importante para a qualidade final da imagem, pois permite especificar a diferença entre os vários níveis de cinzento utilizados na representação de cada imagem. Como o conversor analógico-digital diferencia apenas 64 níveis, abaixo dos 256 considerados discrimináveis pela visão humano, o escalonamento adequado de cinzentos em cada imagem é fundamental para uma percepção conveniente.

O comando “White Balance” permite ajustar os níveis limiares de branco e preto na imagem. Pelo motivo acima enunciado, o ajuste correcto deste parâmetro permite que a imagem cubra todo o espectro entre branco e preto com a totalidade de níveis de cinzento intermédios disponíveis, melhorando significativamente a qualidade final.

Os dois últimos controlos podem ser posicionados no valor predefinido de defeito por actuação nos respectivos botões de “Reset”.

Segundo o exposto em [Ref. 33], o melhor ajuste de parâmetros para imagens de planetas e Lua, consegue-se utilizando o seguinte procedimento: o Contraste é inicialmente colocado a zero e o parâmetro “White Balance” é posicionado por “Reset”; ajusta-se o tempo de exposição manualmente (“Brightness”) e aumenta-se o Contraste até se conseguir uma definição adequada dos detalhes mais finos.

No menu “File” é possível escolher a opção “Auto Capture” que permite realizar uma série sequencial de imagens automaticamente, com um espaçamento de tempo entre imagens consecutivas determinado pelo utilizador, o que se revela útil na aquisição de imagens astronómicas pois permite escolher a imagem adquirida no instante de condições de “seeing” mais favoráveis.

4.3. ANÁLISE DA CÂMARA COMERCIAL “STARLIGHT XPRESS MX916”

Com o intuito de complementar o estudo realizado e no sentido de dispor de um elemento para comparação com as duas câmaras construídas, nesta secção proceder-se-á à análise das características de uma câmara comercial, especificamente construída para aplicações astronómicas de carácter amador.

A câmara em questão, “Starlight Xpress MX916”, foi adquirida pelo Clube de Astronomia da Escola Secundária da Sertã, no âmbito do programa Ciência-Viva, tendo orçado em cerca de 400.000\$00.

Em operação, revela-se um sistema de aquisição de imagem com muito bom desempenho, de utilização simples e prática, ideal para actividades de observação astronómica de carácter amador ou de divulgação.

4.3.1. Características Gerais:

A câmara “Starlight Xpress MX916” é construída num corpo cilíndrico robusto em alumínio anodizado, com 63 mm de diâmetro e 95 mm de comprimento, que se reproduz na figura 4.64. É equipada com um “chip” detector CCD “ICX083AL”, produzido pela “Sony Semiconductor”, que oferece uma superfície sensível de 8,7 x 6,5 mm, formada por uma matriz de 376(H)x290(V) fotoelementos de geometria quase quadrada, de dimensões 23,2(H)x22,4(V) μm .

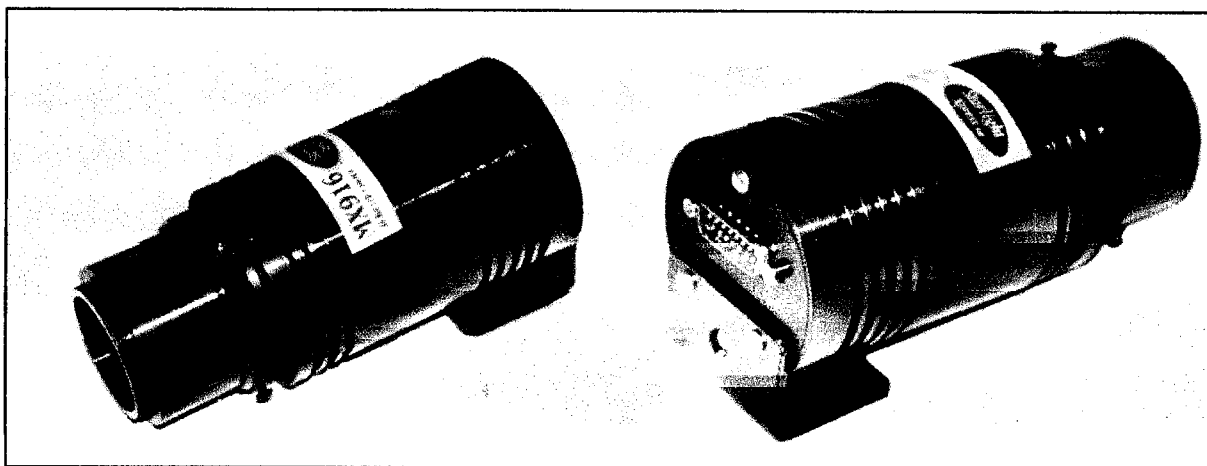


Figura 4.64 – A câmara comercial “Starlight Xpress MX916”.

A refrigeração do detector é obtida por meio de um dispositivo termoelétrico, sobre o qual se encontra directamente montado, sendo o conjunto encerrado num compartimento estanque.

A digitalização do sinal de saída é assegurada por um conversor analógico-digital de 16 bits, codificando 65.536 níveis de quantificação, com uma razão de conversão de cerca de 5 electrões por ADU (unidade analógica-digital, que corresponde à diferença entre dois níveis sucessivos de quantificação, conforme discutido na secção 3.2.4).

Todos os sistemas electrónicos necessários ao funcionamento estão encerrados no corpo da câmara. A comunicação com o computador é realizada por um cabo de 5 metros, através da porta paralela. O sistema é alimentado por uma fonte de alimentação a partir da rede de 220 VAC ou de uma bateria de 12 VDC, conforme o esquema de montagem da figura 4.65.

Segundo o fabricante, a capacidade dos poços de potencial é superior a 300.000 electrões, o valor de “dark current” inferior a 0,1 electrões por segundo e por pixel à temperatura de 10°C e a eficiência quântica é superior a 60% para a radiação de 520 nm de comprimento de onda (luz verde) e superior a 25% em todo o espectro luminoso visível (400 nm a 670 nm). A protecção contra saturação é assegurada por um sistema “anti-blooming” vertical, que permite manter uma elevada linearidade sem perda de área sensível.

Além do “software” de controlo e cabos próprios, são incluídos no sistema dois adaptadores, para montagem em porta-oculares de telescópio, de 1 ¼ polegadas e de 2 polegadas. O último, com roscas tipo M42 nas extremidades, permite ainda a montagem de um sistema de lentes (objectivas “Pentax”).

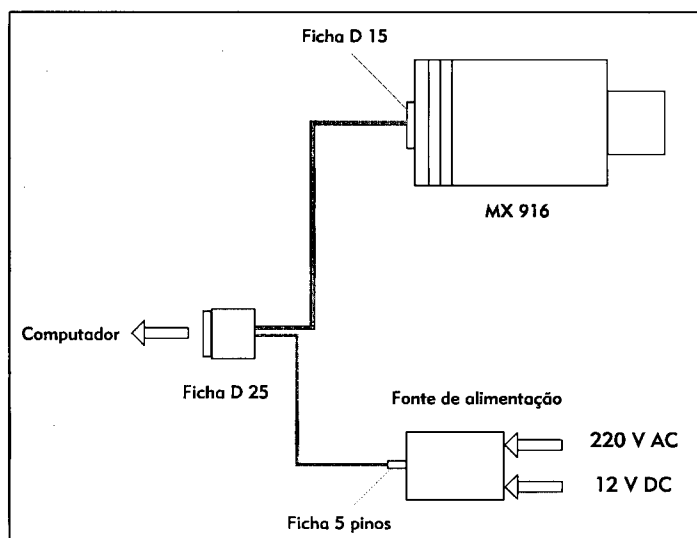


Figura 4.65 – Esquema de montagem da câmara MX 916.

4.3.2. O Detector CCD “SONY ICX083AL”:

A câmara “Starlight Xpress MX916” utiliza como elemento detector CCD o circuito integrado ICX083AL, fabricado pela “Sony Semiconductor”, [Ref. 27], representado na figura 4.66, conjuntamente com o respectivo “pin-out”. Consiste num dispositivo do tipo “interline transfer”, com uma superfície sensível de 8,7 x 6,5 mm, organizada numa matriz de 752(H) x 582(V) fotoelementos de geometria quase quadrada de dimensões 11,6(H)x11,2(V) μm . Como se pode verificar, pela comparação entre estas características e as apresentadas pelo fabricante da câmara, é utilizado um “binning” de 2x2 durante a leitura da imagem. Conforme o diagrama de topologia reproduzido na figura 4.66 b), além dos fotoelementos expostos, existem linhas e colunas extras de fotoelementos destinados a gerarem uma referência para restauração do nível preto do sinal de vídeo, pelo que a matriz total terá a dimensão de 795(H) x 596(V) pixels.

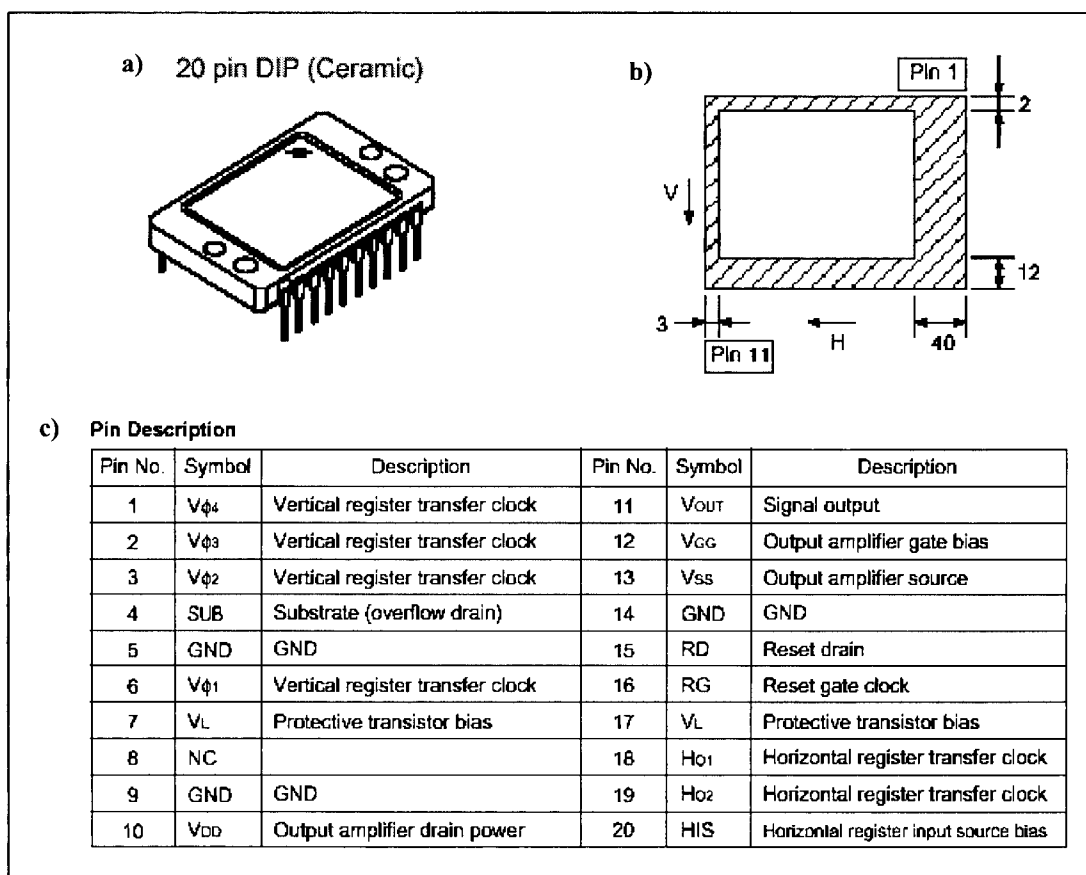


Figura 4.66 - “Chip” detector CCD “Sony ICX083AL” (a), respectivos diagrama de topologia (b) e “pin-out” (c). [Ref. 27].

A transferência de carga é realizada nos registos verticais por quadrupla fase, mecanismo idêntico ao discutido na secção 2.2.1., e por dupla fase (analisada na secção 2.2.2.) no registo horizontal, para leitura série dos pacotes de carga. Na figura 4.67 apresenta-se o diagrama de blocos funcional do detector.

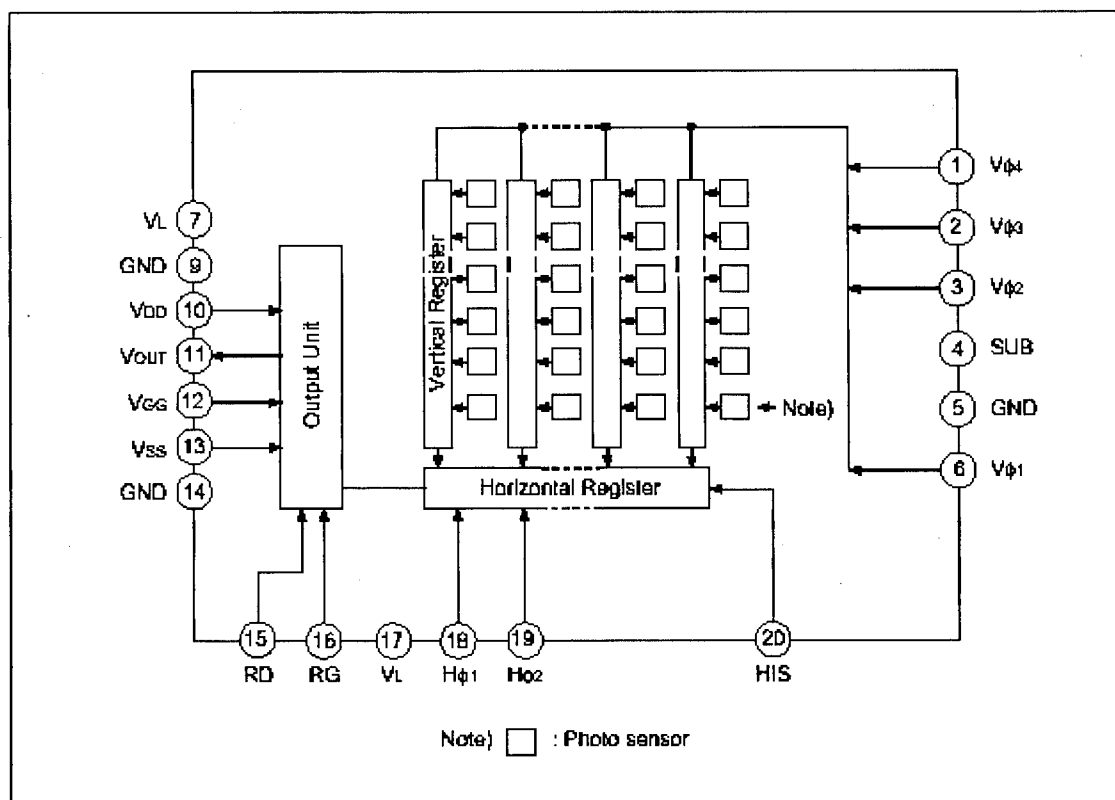


Figura 4.67 – Diagrama de blocos funcional do detector "Sony ICX083AL". [Ref. 27].

A análise dos diagramas temporais, necessários aos procedimentos de transferência e leitura da carga gerada durante a integração, ultrapassa o âmbito desta discussão, podendo ser consultados nas especificações de características fornecidas pelo fabricante, [Ref. 27].

4.3.3. “Software” de Controlo:

O programa de controlo da câmara, “PIX_M9”, foi escrito para correr em qualquer computador PC - compatível, equipado com processador 486DX ou superior, com um mínimo de 16MBytes de memória RAM instalada, sob o sistema operativo “Windows 3.1” ou posterior. A comunicação entre e a câmara realiza-se através da porta paralela, que deverá ser configurada em modo standard. Como opção, o construtor da câmara disponibiliza um sistema para acelerar a comunicação – interface rápida, cujas características podem ser consultadas em [Ref. 28]. Em termos de configuração da placa de vídeo, é recomendado o formato 800x600, com pelo menos 256 níveis de cor. O programa ocupa o espaço de 1,5MBytes em disco, mas, contudo, há que considerar que cada imagem guardada em disco ocupa cerca de 210KBytes.

Em operação, é criado um directório de trabalho, “C:\AUTOSAVE”, onde serão armazenados todos os ficheiros das imagens adquiridas, num formato próprio do programa. É, contudo, possível efectuar a conversão entre esse formato e os formatos “TIFF” ou “FITS”.

O écran principal, possui uma área de imagem e uma barra de menus para acesso às várias operações que pode executar, como é mostrado na figura 4.68, onde o menu “File” se encontra aberto.

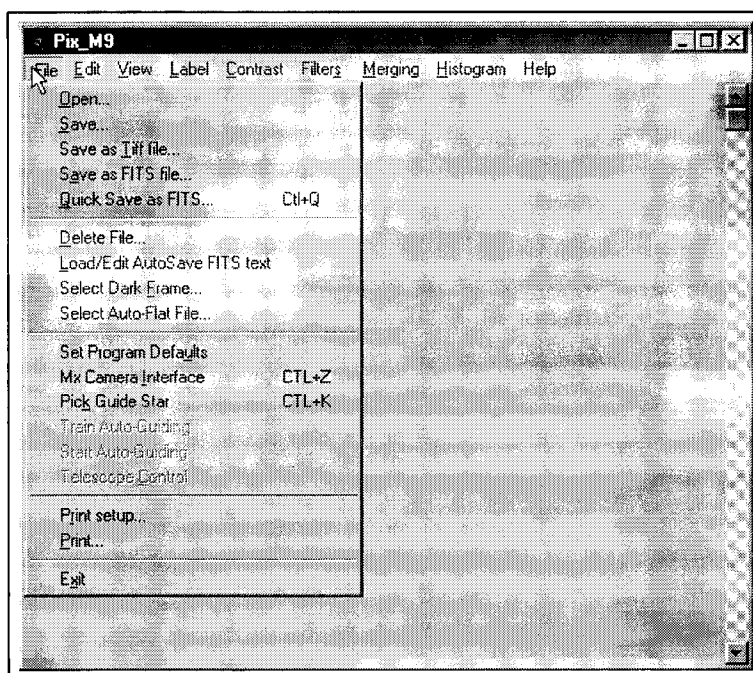


Figura 4.68 – Écran principal do programa de controlo “Pix_M9”, com o menu “File” aberto.

Através do menu “File” é possível aceder às operações de manipulação de ficheiros, impressão e conversão de formatos. A opção “Mx Camera Interface” permite efectuar o comando da câmara através da janela de diálogo que se reproduz na figura 4.69.

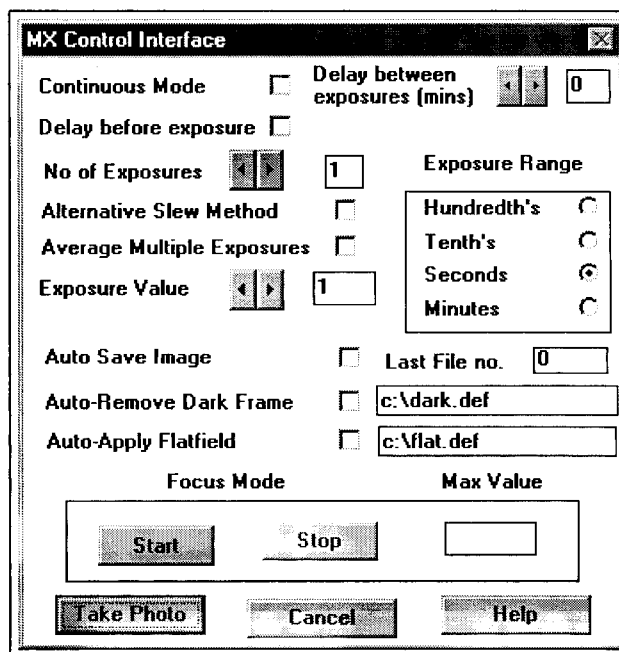


Figura 4.69 – Janela para comando da câmara.

O tempo de exposição é fixado pelos dados introduzidos em “Exposure Value” e “Exposure Range”, sendo permitidos os seguintes valores:

“Hundredth’s” –	1 a 500	x 1/100 segundos;
“Tenth’s” –	1 a 100	x 1/10 segundos;
“Seconds” –	1 a 300	x 1 segundo;
“Minutes” –	1 a 90	x 1 minuto.

O modo de focagem permite a repetição de uma determinada exposição, exibindo sucessivamente no écran a zona central da imagem (1/4 de “frame”, sem “binning”) e o valor máximo de contagem nos pixels, encontrado na imagem, no campo “Max Value” da caixa de diálogo, possibilitando o ajuste de focagem do alvo a adquirir. Após a focagem, este modo, revela-se útil para centrar o alvo no campo de visão, sendo aconselhado utilizar a opção “Auto Contrast Stretch” do menu “View” na pesquisa de nebulosas ou campos estelares densos.

É ainda oferecido um modo para a realização de múltiplas exposições – “Continuous Mode”, com opções de processamento automático poderosas. Uma vez seleccionado na caixa respectiva e indicado o número de exposições pretendido, o

programa realiza-as automaticamente, separadas ou não pelo intervalo de tempo introduzido na caixa "Delay between exposures", e tentará adicioná-las automaticamente pixel a pixel, o que conduz a bons resultados no caso de existirem estrelas brilhantes e bem focadas no centro da imagem, utilizadas pelo programa como referência na compensação de eventuais desalinhamentos, resultantes da guiagem do telescópio, para a correcta sobreposição das várias imagens. Alternativamente, ao tratarem-se de campos estelares densos ou nebulosas onde não se individualizam estrelas brilhantes, é preferível marcar a opção "Alternative Slew Method", para a qual o programa tentará realizar as compensações necessárias através da pesquisa da melhor adaptação de linhas e colunas na adição das diversas imagens. Outra alternativa consiste na realização automática da média das sucessivas imagens, marcando a opção "Average Multiple Exposures", o que conduz a uma redução do ruído, embora não torne a imagem final mais brilhante, contrariamente às técnicas de adição.

Tanto no modo de múltiplas exposições, como no de imagem a imagem, é possível efectuar pré-processamento automático, removendo uma "dark frame" e aplicando um "flat field", previamente definidos pelas opções "Select Dark Frame..." e "Select Auto-Flat File..." do menu "File".

O fabricante da câmara, actualiza periodicamente o "Software", disponibilizando as novas versões para descarregamento gratuito no seu "site" na Internet, [Ref. 28]. Após a aquisição da câmara, com o programa de controlo original, foi obtida uma versão mais recente onde se podem realizar imagens em modo de alta resolução, ou seja, sem o "binning" 2x2 de defeito referido na secção anterior, utilizando uma matriz de dimensão 752(H)x580(V) fotoelementos de dimensões 11,6(H)x11,2(V) μm , explorando ao máximo as características do "chip" detector ("binning" 1x1). A nova caixa de diálogo para comando da câmara está reproduzida na figura 4.70, onde se pode verificar a introdução de melhoramentos no modo de focagem.

O menu "View" possibilita alterar o modo de exibição da imagem, sem modificar os respectivos dados armazenados, disponibilizando as seguintes opções:

"Fit to Window" – adapta a imagem à janela de exibição;

"Change to MX Geometry" – corrige a imagem de modo a compensar a geometria não perfeitamente quadrada dos fotoelementos;

"Enlarge by 50%" – opção de zoom;

“False Color Pallete” – Altera a tabela de correspondência valor – tonalidade (palette) de cinzentos para cores falsas;

“Auto Contrast Stretch Image” – Recalcula a paleta de exibição da imagem de acordo com o seu conteúdo, permitindo aumentar artificialmente o brilho e contraste da imagem exibida de modo aos detalhes serem evidenciados;

“Mirror Image” – inverte a imagem horizontalmente;

“Photometry of Image” – realiza leituras de comparação fotométrica;

“3-D Intensity Plot” – gera um gráfico tridimensional de intensidades;

“Intensity Plot of Current Line” – traça um gráfico bidimensional da intensidade ao longo de uma linha de imagem escolhida pelo utilizador;

“Show/Edit Current Fits Details” – permite inspeccionar e editar comentários de texto nos ficheiros de imagem em formato “FITS”;

“Processing History” – regista o historial do processamento de uma imagem em formato “FITS”.

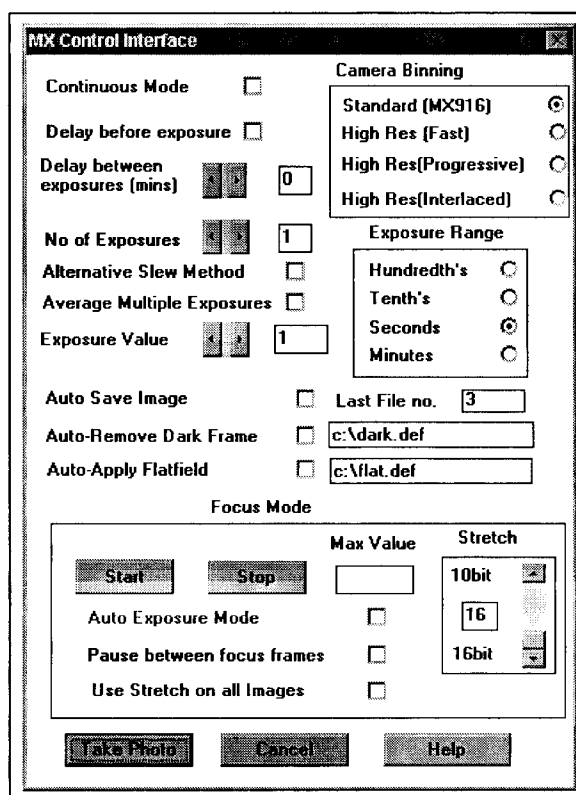


Figura 4.70 – Nova versão do écran de comando da câmara.

Os menus “Contrast” e “Filters” disponibilizam diversas funções de pós - processamento de imagem, cuja discussão ultrapassa o âmbito desta análise. Alteraram as matrizes de dados que descrevem as imagens, permitindo melhorar o contraste, evidenciar detalhes ou reduzir o ruído.

O menu "Merging" possibilita a subtração de "dark frame" e aplicação de "flat field" não automáticas, assim como a execução manual do processo de adição ou média de duas imagens.

Finalmente, o menu "Histogram" traça o histograma da imagem actualmente exibida, reproduzindo-se um exemplo na figura 4.71, para uma imagem da Lua.

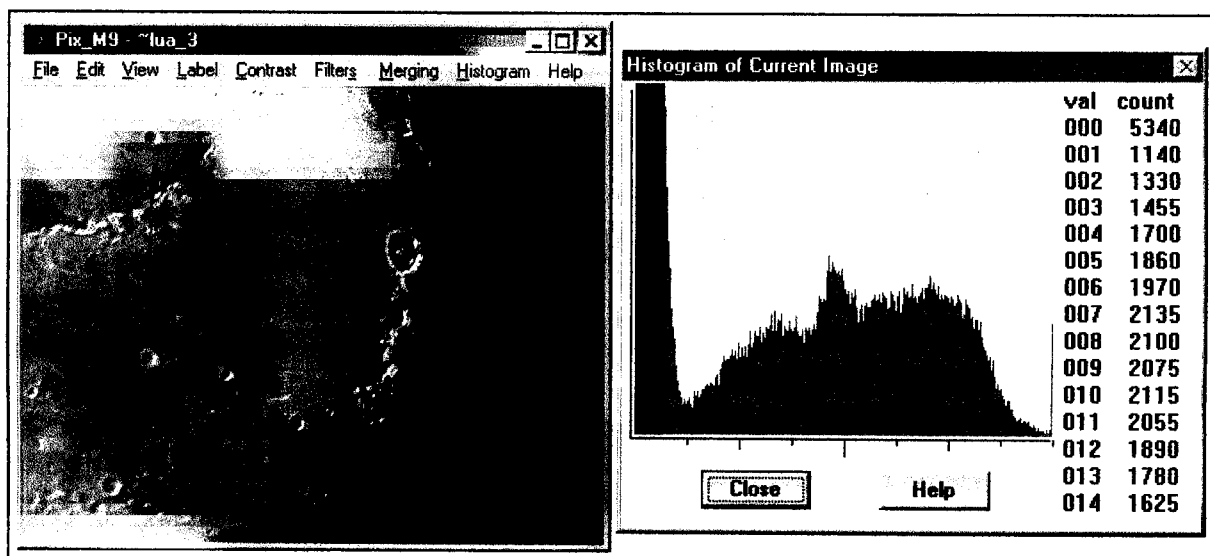


Figura 4.71 – Imagem obtida da Lua e respectivo histograma, traçado automaticamente pelo programa de controlo, através do menu "Histogram".

A escala horizontal representa valores de intensidade (contagem de carga), desde 0 (preto) a 255 (branco), enquanto a escala vertical corresponde ao número de pixels na imagem com um determinado valor de intensidade. Como a escala vertical varia desde 0 a 1.000, sempre que existam mais do que 1.000 pixels com o mesmo valor, a respectiva linha é truncada e exibida a vermelho. À direita do gráfico existe um quadro com os primeiros 15 valores para os quais foram contados mais de 1.000 pixels.

4.4. ESTUDO COMPARATIVO DAS CÂMARAS

Dispondo de três câmaras diferentes, será necessário realizar um estudo comparativo das suas características e respectivos desempenhos, de modo a compreender as suas diferenças operacionais, estabelecer os seus limites funcionais e desenvolver técnicas adequadas de operação, com o intuito de se conseguir tirar o melhor partido possível do equipamento existente e otimizar a qualidade das imagens / detecções a realizar.

Será esse o objectivo desta secção, onde se irá realizar um estudo comparativo teórico das características geométricas das três câmaras, aferir as diferentes eficiências quânticas a partir dos dados fornecidos pelos construtores dos respectivos “chips” detectores, testar e medir em bancada de ensaios algumas características operacionais.

4.4.1. Características Geométricas:

Na presente discussão, será sempre considerado que as câmaras CCD se encontram montadas no foco principal de um telescópio de abertura 20cm e distância focal de 200cm, características de um telescópio “Celestron” de 8 polegadas de óptica tipo “Schmidt-Cassegrain”, típicas dos normalmente utilizados em actividades de observação de carácter amador ou de divulgação.

A tabela 4.5 resume as características geométricas dos detectores CCD que equipam as três câmaras. Os valores apresentados nas colunas relativas a resolução espacial por pixel e campo de visão, foram calculadas com base na expressão (3.3) e de acordo com os pressupostos discutidos na secção 3.1.2..

Câmaras	N.º de pixels		Dimensão pixels (μm)		Superfície sensível (mm)		Resolução espacial por pixel (seg.-arco)	Campo de visão (min.-arco)
	H	V	H	V	H	V		
CB245 a)	252	242	25,5	19,7	6,4	4,8	2,3"	11,0'x8,3'
CB245 b)	378	242	17,0	19,7	6,4	4,8	1,9"	11,0'x8,3'
QuickCam	320	240	10	10	3,2	2,4	1,0"	5,5'x4,9'
Starlight MX916	376	290	23,2	22,4	8,7	6,5	2,4"	15,0'x11,2'

Notas: a) “binning” 3x1; b) Modo “Wide” – “binning” 2x1

Tabela 4.5 – Comparação das características geométricas das três câmaras.

A figura 4.72 ilustra a comparação entre as dimensões das superfícies sensíveis dos detectores, permitindo inferir os diferentes campos de visão que se podem obter com as três câmaras.

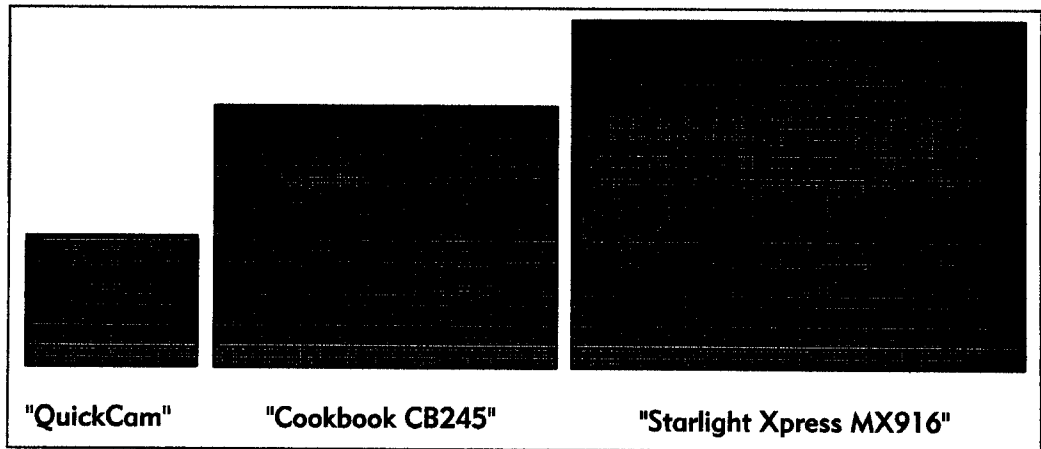


Figura 4.72 – Comparação de dimensões das superfícies sensíveis dos detectores.

Na figura 4.73 reproduz-se o ábaco discutido na secção 3.1.3. (figura 3.4), sobre o qual se sobrepuseram as rectas respeitantes às quatro situações da tabela 4.5, para efeitos de comparação.

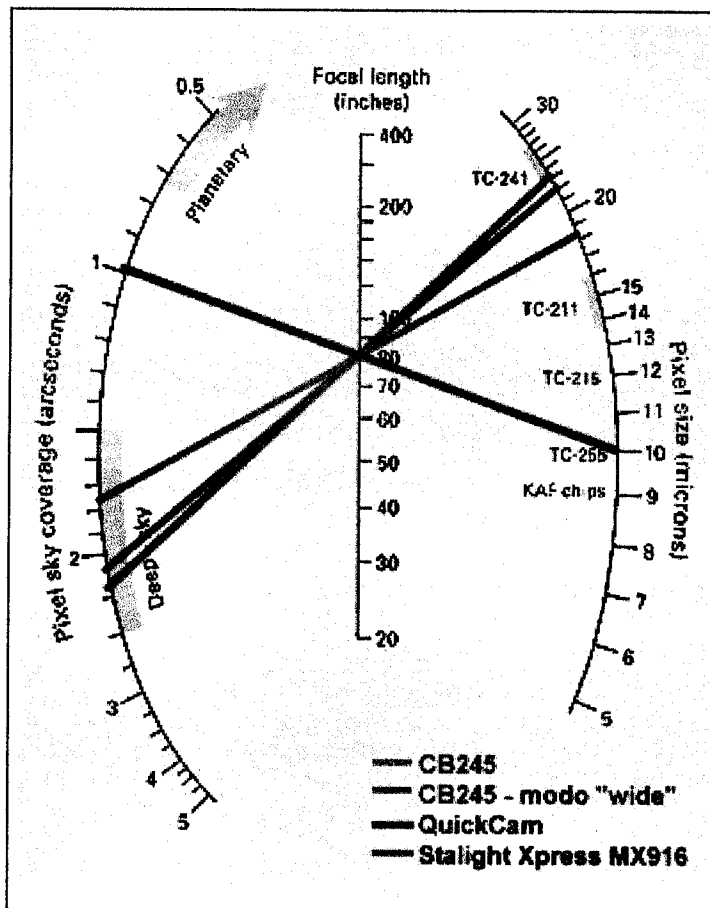


Figura 4.73 – Relacionamento gráfico entre as dimensões médias dos pixels de cada câmara e resolução espacial por pixel respectiva.

Conforme se pode facilmente concluir da figura anterior, as câmaras “Starlight Xpress MX916” e “Cookbook CB245” serão adequadas para a realização de imagens do céu profundo (campos estelares, nebulosas e galáxias), enquanto a câmara “QuickCam” estará mais adequada para a obtenção de imagens planetárias.

4.4.2. Eficiência Quântica:

Como discutido nas secções 3.2.1. e 3.2.2. a eficiência quântica e a resposta espectral são características intrínsecas dos detectores CCD, cujo conhecimento se revela importante em operação, pois permitem determinar o tempo de exposição necessário à aquisição de determinado objecto, em função da sua luminosidade e conteúdo espectral. Por outro lado, serão características com as quais se terá de lidar em caso de se pretender realizar actividades de fotometria ou astrofotografia a cores por interposição de filtros.

A determinação experimental dos valores absolutos relativos a estas características, torna-se impraticável nas condições de que normalmente se dispõe, pois exige equipamento de medida e teste específico, só ao alcance de um laboratório avançado de óptica e fotometria. Por essa razão, aqui só serão reproduzidos os dados fornecidos pelos fabricantes dos detectores, para efeitos de referência e comparação, na figura 4.74. Com base nessa figura é possível concluir que os detectores fabricados pela “Texas Instruments” e que equipam as câmaras “Cookbook CB245” e “QuickCam” apresentam picos de resposta para as radiações nos comprimentos de onda vermelhos e infravermelhos, enquanto o detector fabricado pela “Sony Semiconductor”, que equipa a câmara “Starlight Xpress MX916”, revela uma resposta máxima para as radiações nos comprimentos de onda correspondentes à cor verde (520 nm), apresentando uma resposta mais constante na gama e radiações correspondente ao visível (400 a 670 nm). Estas características espectrais tornam a última câmara mais adequada a aplicações de astrofotografia a cores por interposição de filtros e de fotometria na região visível. Por outro lado, o pico de resposta dos detectores fabricados pela “Texas Instruments” obriga a cuidados especiais na sua utilização, pela facilidade com que atingem a saturação para objectos ricos em componentes espectrais infravermelhas (por exemplo, Sol e Lua).

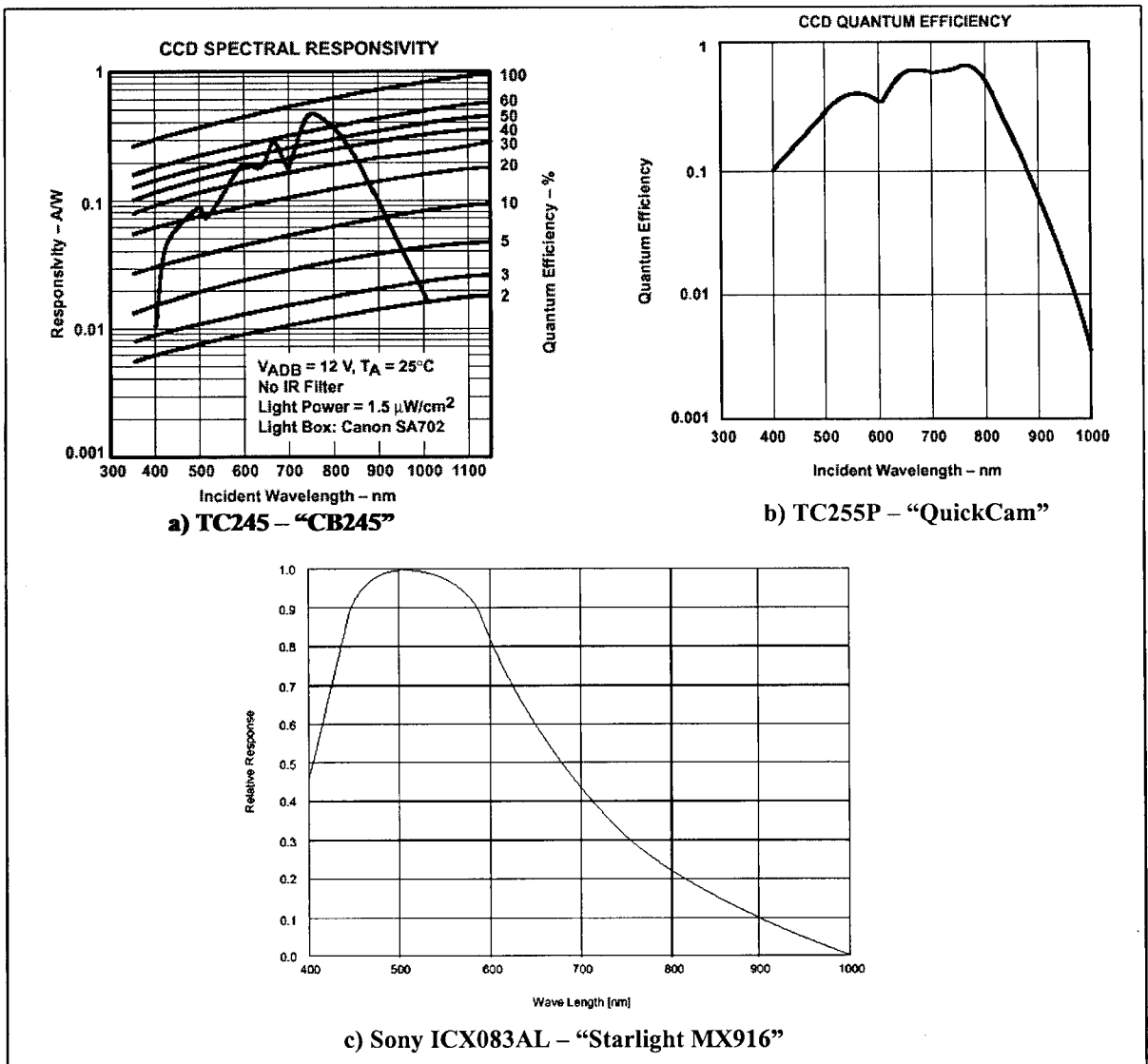


Figura 4.74 – Comparação entre as respostas espectrais dos detectores CCD que equipam as três câmaras. Adaptado de [Ref. 26] e [Ref. 27].

4.4.3. Ensaaios:

Pretendendo-se testar e medir algumas características operacionais das câmaras, optou-se por construir um protótipo de uma bancada de ensaios, sugerida no documento "check245.htm", disponível em [Ref.23], e cujo esquema se apresenta na figura 4.75. A montagem foi concretizada em aglomerado de madeira, pintado interiormente de preto baço. Tanto de lado da câmara CCD, como da lâmpada, foram improvisados receptáculos para a recepção de um conjunto de slides, permitindo controlar a quantidade de radiação que chega à superfície de detecção da câmara. Assim, do lado da lâmpada, além de um difusor de luz permanente em acrílico opalino, é possível montar slides de diafragmas com determinada gama de diâmetros. Do lado oposto, ou se intercala um segundo écran de difusão ou um slide escuro (opaco), destinado a cortar toda a radiação incidente.

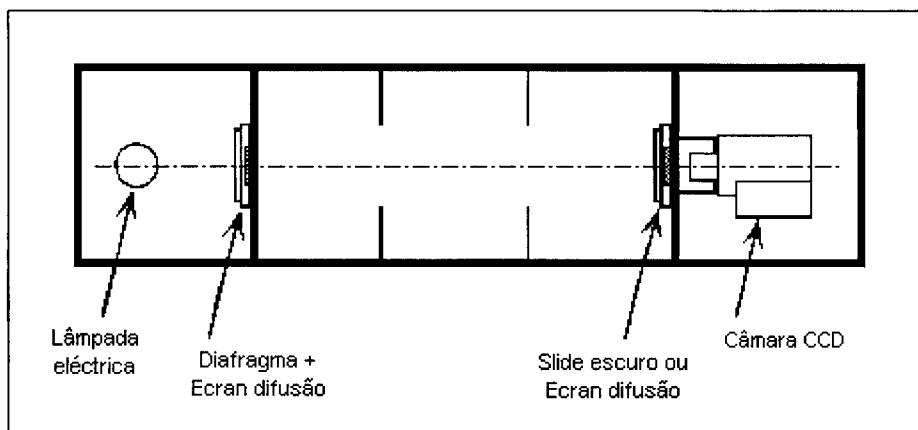


Figura 4.75 – Bancada experimental de ensaios de câmaras CCD.

Os slides referidos, com as dimensões aproximadas de 50 mm x 50 mm, foram realizados a partir de placa de ebonite banhada a cobre numa face, utilizada usualmente no fabrico de circuitos impressos. A gama de diferentes diâmetros de abertura, a utilizar como diafragmas, obteve-se perfurando os slides com diferentes brocas. Enumerando:

- | | | |
|------------------|--------------------|-------------------|
| 1 furo de 24 mm; | 2 furos de 12 mm; | 1 furo de 12 mm; |
| 2 furos de 6 mm; | 1 furo de 6 mm; | 2 furos de 3 mm; |
| 1 furo de 3 mm; | 2 furos de 1,5 mm; | 1 furo de 1,5 mm; |

Deste modo, decrescendo as áreas das aberturas em progressão geométrica 2:1 ao longo do conjunto, a quantidade de luz que penetra na caixa vai diminuindo na mesma proporção. O écran de difusão a colocar junto do detector foi realizado

colando papel branco comum num slide com abertura central de 45 mm. A câmara é fixada em posição por meio de um “porta-oculares” improvisado em madeira.

No protótipo montado, foram utilizados apenas três painéis exteriores, deixando aberta a face superior para acesso, a fim de permitir a permuta de slides, sendo coberta durante as experimentações com pano preto, cuidadosamente fixado de modo a não permitir qualquer entrada de luz exterior.

Os ensaios realizados consistiram na realização de aquisições de imagem em três diferentes condições de exposição:

- “Bias” – exposições muito rápidas sem iluminação., que permitem determinar o ruído de leitura do equipamento (“read-out noise”);
- “Dark” – exposição sem iluminação, com tempo de integração variável, permitindo medir a carga térmica acumulada nos fotoelementos (“dark current”);
- “Flat” – exposição com iluminação homogénea da superfície detectora, com variados tempos de integração, permitindo conhecer a resposta do detector à radiação incidente.

As imagens resultantes são tratadas aritmética e estatisticamente por “software” de processamento de imagens específico, analisado no Capítulo 6. Os dados resultantes, basicamente o valor médio e a variância da contagem da carga (electrões) dos pixels, representam medidas do sinal detectado e do ruído associado, como evidenciado na subsecção 3.2.4.. Conforme então discutido, a incerteza associada à contagem dos electrões no nó de detecção (ruído) é proveniente de duas origens: ruído fotónico, seguindo uma distribuição estatística de Poisson e ruído de leitura ou “read-out noise”, intrínseco ao equipamento. No nó de detecção detecta-se carga eléctrica, ou seja, contam-se electrões (e^-), pelo que o desvio padrão dessa contagem, σ_e , expresso em electrões, mede o ruído associado ao sinal detectado (S_e). Será:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_f^2 + \sigma_b^2} \quad (4.1)$$

onde σ_f^2 e σ_b^2 representam as variâncias das contagens relativas a cargas de origem fotónica e ao equivalente de cargas correspondente ao ruído de leitura, respectivamente.

Contudo os dados obtidos da análise das imagens, são resultantes do tratamento de digitalização proporcionado pelo conversor analógico digital, podendo

ser expressos em unidades analógico-digitais (ADU), conforme se viu na secção 3.2.4., expressão (3.13). Assim, pode-se definir como factor de conversão, expresso em ADU/e⁻, o parâmetro g, que relaciona os sinais presentes no nó de detecção (S_e) em e⁻, e na saída do conversor analógico-digital (S_{ADU}) em ADU:

$$S_e = g \cdot S_{ADU} \quad (4.2)$$

A componente fotónica dos electrões presentes no nó de detecção, S_f, obedecendo à distribuição de Poisson, caracteriza-se por apresentar um desvio padrão $\sigma_f = \sqrt{S_f}$, pelo que:

$$\sigma_f^2 = S_f = g \cdot S_{ADU} \quad (4.3)$$

Na dedução da expressão anterior considerou-se S_f = S_e, situação que ocorre quando se subtrai o sinal de origem térmica do sinal total detectado, o que pode ser conseguido através da subtracção de uma imagem de uma exposição “dark” com idêntico tempo de integração da imagem da exposição em análise.

Outra quantidade mensurável será o desvio padrão, em ADU, dos valores relativos aos pixels de uma imagem “flat”, obtida sob iluminação uniforme, σ_{ADU} . Mesmo considerando a não perfeita homogeneidade da iluminação, a subtracção de duas imagens obtidas em idênticas condições, permite eliminar os efeitos de eventuais não-uniformidades, restando apenas a soma quadrática dos ruídos associados às duas imagens. A leitura do desvio-padrão desse valor restante, σ_{ADU} , relaciona-se com o ruído no nó de detecção, por:

$$\sqrt{2} \cdot \sigma_e = g \cdot \sigma_{ADU} \quad (4.4)$$

Substituindo as expressões (4.3) e (4.4) na expressão do ruído presente numa imagem (4.1), será:

$$\frac{g^2}{2} \cdot \sigma_{ADU}^2 = g \cdot S_{ADU} + \sigma_b^2 \quad (4.5)$$

$$\sigma_{ADU}^2 = \frac{2}{g} \cdot S_{ADU} + 2 \cdot \frac{\sigma_b^2}{g^2}$$

A expressão anterior representa uma relação linear entre os valores observados nos pixels de uma imagem e a respectiva variância, pelo que a aplicação do método de regressão linear, permite determinar o factor de conversão g e o ruído de leitura σ_b , conforme a figura 4.76.

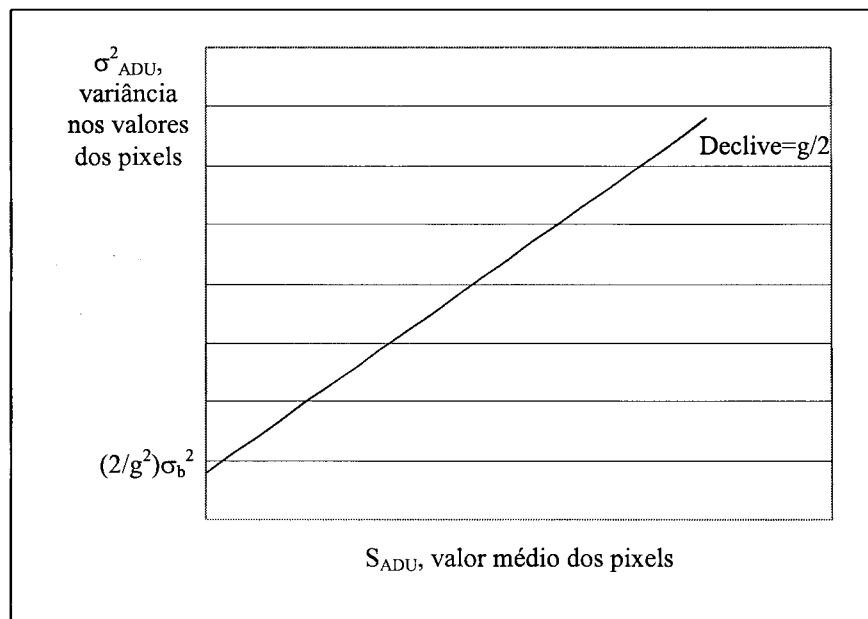


Figura 4.76 – Determinação experimental do factor de conversão, g .

O procedimento experimental, consiste em realizar uma série de exposições “flat” a luz constante, com tempos de integração diferenciados. Para cada tempo de integração realizam-se duas exposições “flat” e uma “dark”. Da subtracção de uma imagem “flat” pela imagem “dark” calcula-se o correspondente valor médio dos pixels e da subtracção das duas “flat” infere-se o valor da variância. O teste é efectuado em duas fases, com tempos de exposição crescentes e depois decrescentes.

A partir dos valores obtidos no teste anterior pode ser evidenciada a linearidade dos detectores, bastando representar S_{ADU} em função do tempo de integração t .

O método anteriormente descrito de cálculo do ruído de leitura revela-se impreciso, sendo preferível realizar uma série de várias (9) exposições “Bias”, lendo os valores apresentados nos pixels das imagens, calculando a sua média e desvio-padrão. A média dos desvios-padrão observados constitui uma medida mais directa e exacta do ruído de leitura.

Realizando algumas exposições “dark”, de tempo de integração suficientemente elevado para permitir um preenchimento significativo dos poços de

potencial dos fotoelementos com carga térmica, mas sem atingir a saturação, seguidas de exposições “bias”, o valor médio lido nos pixels da imagem, obtida por subtração das duas exposições, será uma medida da carga térmica acumulada, podendo-se inferir a taxa de acumulação de “dark current” em ADU/pixel/s ou em e^- /pixel/s, aplicando o factor de conversão.

No Apêndice I são apresentados os relatórios da aplicação destes testes às câmaras “Cookbook 245” e “Starlight Xpress MX916”, constituindo a tabela 4.6 um resumo dos resultados experimentais obtidos. Para melhor compreensão dos valores apresentados, convém referir que os testes da câmara MX916 foram realizados com quatro vezes mais fluxo luminoso (dobro do diâmetro do diafragma) que no caso da câmara CB245 e que o intervalo de variação dos valores nos pixels desta câmara (12bits – 4096 ADU máximo) é 16 vezes menor que o correspondente na câmara MX916 (16bits-65536 ADU máximo).

Parâmetro	CB245	MX916
Factor de conversão, g	28 e^- /ADU	2,5 e^- /ADU
Ruído de leitura	25 e^- (RMS)	50 e^- (RMS)
“Dark Current”	125 e^- /pixel/s	1 e^- /pixel/s

Tabela 4.6 – Quadro resumo dos resultados experimentais obtidos para as câmaras “Cookbook CB245” e “Starlight Xpress MX916”.

Relativamente à câmara “Cookbook CB245” verifica-se conformidade entre os resultados experimentais e os valores apresentados como típicos do desempenho da câmara em [Ref.2] e [Ref.23]. De referir o elevado valor da carga térmica, “dark current”, justificando plenamente a actualização proposta em [Ref.23], conhecida por “Low Dark Current Upgrade”, que consiste na realização de ligeiras alterações nas placas electrónicas da câmara e numa versão melhorada do respectivo programa de controlo.

Em relação à câmara “Starlight Xpress MX916”, os parâmetros factor de conversão e “dark current” estão de acordo com as especificações apresentadas em [Ref.12], mas o ruído de leitura medido revela-se demasiado elevado. Tal pode ser originado por ruído electromagnético externo presente durante a experimentação, procedimento experimental mal conduzido ou deficiência do equipamento.

Analisando detalhadamente as imagens “bias” adquiridas (figura 4.77), verificou-se a existência de um gradiente que percorre a imagem, sugerindo erro que se vai acumulando durante a leitura de cada linha, o que pode ser originado por ligações deficientes do equipamento à Terra, ou interferências electromagnéticas de alta frequência (monitor do terminal?). Existe portanto, a necessidade de executar testes mais aprofundados a fim de identificar e debelar o problema, sugerindo-se a realização do procedimento de aquisição de exposições “bias” em diferentes ambientes experimentais e com tempos de integração diferentes do utilizado (mínimo disponibilizado pelo programa de controlo – 10 ms).

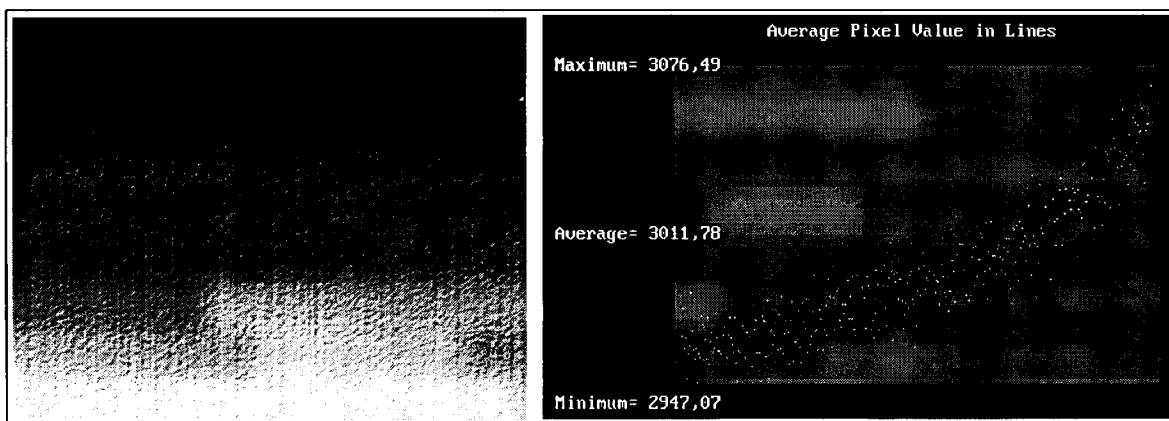


Figura 4.77 – Análise pormenorizada da imagem de uma exposição “bias”. O contraste foi artificialmente exagerado de modo a permitir identificar o gradiente referido no texto.

Relativamente à terceira câmara, “Quickcam”, não são apresentados resultados por se ter chegado à conclusão que a câmara possui um funcionamento em parte automático (ganho – “White Balance”), que o “software” de controlo não permite inibir, resultando na obtenção de imagens de idênticas exposições com níveis de sinal aleatório. Por outro lado, os ficheiros de imagem obtidos são codificados em mapa de bits de 256 cores indexadas, obrigando a uma conversão para ficheiro FITS (ver Cap. 6) antes do tratamento analítico da imagem. Ainda, pelo facto da conversão analógico-digital ser realizada com apenas 6 bits (64 ADU máximo), os resultados de um tratamento estatístico seriam pouco precisos.

Comparando os desempenhos das duas câmaras analisadas, poder-se-ia concluir que a câmara “MX916” tendo um menor factor de conversão, seria mais sensível a alterações do fluxo luminoso. Contudo o valor encontrado para tal parâmetro depende directamente do número de bits do conversor analógico-digital, e caso a câmara CB245 fosse equipada por um conversor de 16 bits, como a “MX916”, o valor que se teria encontrado seria $g=1,75 \text{ e}^-/\text{ADU}$ (28/16). Na realidade,

a câmara “CB245” revela-se mais sensível à radiação luminosa, uma vez que apresenta um declive na curva de linearidade maior que a outra câmara, como se pode observar nas figuras A1.2 e A1.3 do Apêndice I, obtido com quatro vezes menos fluxo luminoso (diafragma com metade do diâmetro), sendo a área dos seus pixels aproximada.

O pior nível de ruído de leitura apresentado pela câmara “MX916” e já discutido, situa-se tipicamente, segundo o fabricante, em menos de 15 e⁻(RMS), bastante próximo do nível medido para a câmara “CB245”.

Relativamente ao restante parâmetro, o muito melhor desempenho em “dark current” da câmara “MX916” pode ser atingido pela câmara “CB245”, desde que se execute o melhoramento já referido, que, segundo a informação disponibilizada em [Ref.23], se traduz pela redução de um factor de 100 no valor de “dark current”.

A tentativa de testar a câmara “QuickCam” em condições idênticas para possível comparação de desempenho com as outras câmaras, embora frustrada, permitiu inferir que esta câmara apresenta uma muito menor sensibilidade à radiação luminosa que as restantes. Tal pode ser em parte justificado pelo facto dos seus pixels terem uma área de cerca de 1/5 das apresentadas pelas outras câmaras, recebendo cada um 1/5 dos fotões incidentes em idênticas condições experimentais. Na realidade, com a câmara montada na bancada de ensaios, verificou-se que só se obtinha sinal apreciável retirando o diafragma e o segundo écran de difusão.

- CAPÍTULO 5 -

TÉCNICAS DE OBSERVAÇÃO COM
CÂMARAS CCD

5. TÉCNICAS DE OBSERVAÇÃO COM CÂMARAS CCD

Uma câmara CCD representa apenas o equipamento terminal de um sistema de aquisição de imagem digital astronómica, uma vez que terá de ser acoplado a uma cadeia de equipamentos ópticos e mecânicos fundamentais para a sua operação. O sucesso e a qualidade da imagem digital obtida depende em grande parte de uma correcta integração do sistema e conveniente manipulação dos equipamentos ópticos e mecânicos existentes a montante da câmara CCD.

Por outro lado, qualquer tipo de observação astronómica consiste na pesquisa do firmamento e das suas particularidades com instrumentos, cujas capacidades e potencialidades deverão ser exploradas de modo a otimizar o sistema, adaptando-o à finalidade pretendida e ao alvo em questão.

Na figura 5.1 pretende-se esquematizar a constituição de um sistema de aquisição de imagem digital astronómica, individualizando os seus elementos constituintes, bem como os procedimentos de operação necessários à aquisição de imagem.

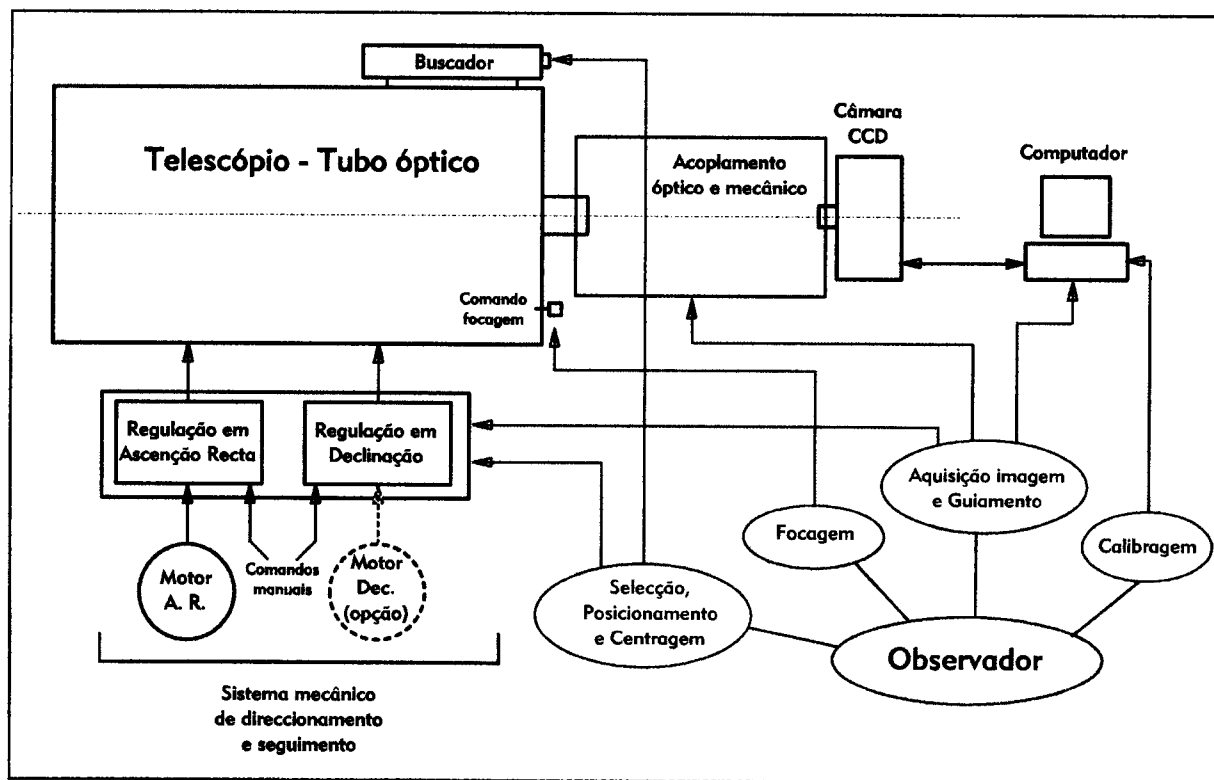


Figura 5.1 – Sistema de aquisição de imagem astronómica digital.

De um modo geral, uma operação de aquisição de imagem envolve um conjunto de procedimentos a realizar sequencialmente pelo observador, com o máximo de precisão permitido pelo equipamento utilizado, dos quais se destacam:

- Selecção, posicionamento e centragem do objecto - alvo no campo de visão do detector de imagem;
- Focagem da imagem;
- Aquisição da imagem, garantindo que a posição da imagem do objecto – alvo no detector se mantenha precisamente fixa durante o tempo de exposição (Seguimento e Guiamento);
- Calibragem das imagens obtidas.

A precisão conseguida nas diferentes fases do processo determina a qualidade do produto final e implica um conhecimento aprofundado dos equipamentos constituintes, bem como das respectivas técnicas de operação. Contudo, é também importante realçar a necessidade de um espírito de experimentação, persistência e paciência até se conseguir atingir a prática necessária a um desempenho de sucesso.

Portanto, justifica-se dedicar o presente capítulo à discussão pormenorizada dos equipamentos constituintes de um sistema de aquisição de imagem astronómica e respectivos procedimentos e técnicas de operação. Nos subcapítulos subsequentes serão discutidos aspectos relativos aos sistemas ópticos e mecânicos do telescópio e respectivas técnicas de operação, e serão analisados os dispositivos necessários ao correcto acoplamento da câmara CCD ao telescópio. Posteriormente discutir-se-á o processo de calibragem das imagens obtidas pelo sistema, de modo a reduzir o ruído associado, e serão afloradas técnicas tricromáticas para obtenção de imagens a cores.

5.1. TELESCÓPIO

Conforme evidenciado na figura 5.1, o telescópio desempenha um papel fundamental no sistema de aquisição de imagem, uma vez que permite focar a imagem do objecto a adquirir sobre a superfície sensível do detector com o seu subsistema óptico, apontando ao alvo e mantendo fixa a sua posição durante a exposição através do seu subsistema mecânico.

De acordo com o espírito subjacente ao presente trabalho, terá interesse considerar na análise que se segue, um telescópio tipicamente destinado a aplicações de carácter amador, de custo acessível a entidades promotoras de actividades educativas e de divulgação. Pela exclusiva razão de ser o telescópio disponível para a realização das actividades práticas de observação descritas no presente texto, optou-se pelo telescópio da marca “CELESTRON”, modelo “CELESTAR 8”, ilustrado na figura 5.2, com 8 polegadas de abertura e sistema óptico “Schmidt-Cassegrain”, o que lhe confere a portabilidade necessária ao tipo de actividades consideradas.



Figura 5.2 – Telescópio “CELESTRON – CELESTAR 8”, utilizado nas actividades de observação.

5.1.1. Características do subsistema óptico:

Do ponto de vista do seu subsistema óptico, um telescópio consiste num instrumento capaz de colectar e focar radiação luminosa. O processo através do qual os raios luminosos são focados é determinado pelo tipo de desenho óptico: nalguns telescópios, designados refractores, é usado um sistema de lentes; noutros, os reflectores, são utilizados espelhos.

No sistema óptico “Schmidt-Cassegrain” a focagem é obtida por uma combinação de espelhos e lentes, sendo também referidos por telescópios compostos ou catadióptricos. Com este tipo de desenho consegue-se obter óptica de grande diâmetro de abertura, e portanto elevado poder colector, mantendo reduzido o comprimento do tubo óptico, conferindo ao sistema grande portabilidade, razão pela qual se torna atractivo para aplicações de carácter amador. A figura 5.3 esquematiza um tubo óptico deste tipo, em corte, estando evidenciado o percurso dos raios luminosos e identificados os três elementos ópticos que o constituem:

- Espelho primário esférico com abertura central;
- Espelho secundário convexo, colocado no mesmo eixo óptico do espelho primário, permitindo obter um plano focal no exterior do tubo, por trás do espelho primário – foco “Cassegrain”;
- Lente correctora de “Schmidt”, destinada à correcção da aberração esférica do espelho primário.

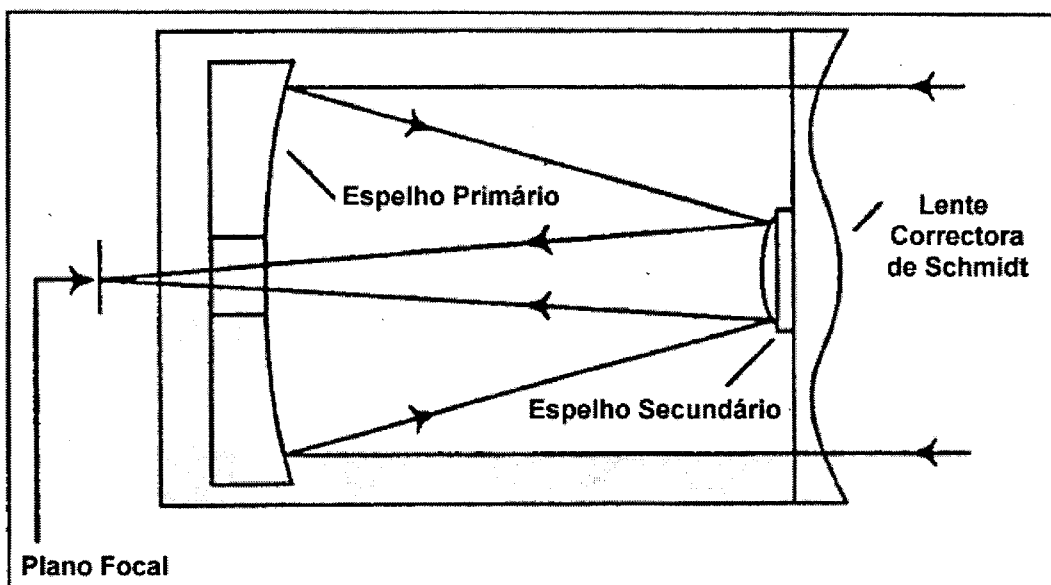


Figura 5.3 – Corte de um tubo óptico de um telescópio tipo “Schmidt-Cassegrain”.

Na figura 5.4 exibem-se duas vistas do telescópio em análise: a primeira, frontal, mostra em primeiro plano a lente correctora de "Schmidt", permitindo ainda distinguir o espelho primário no fundo do tubo óptico; a segunda, mostra a parte posterior do espelho primário, distinguindo-se a abertura central, destinada a montar a lente ocular para observar a imagem formada no plano focal, e o controlo de focagem, à direita, que actuando na posição do espelho primário, permite avançar e recuar o plano focal, adaptando-o à distância focal da ocular.

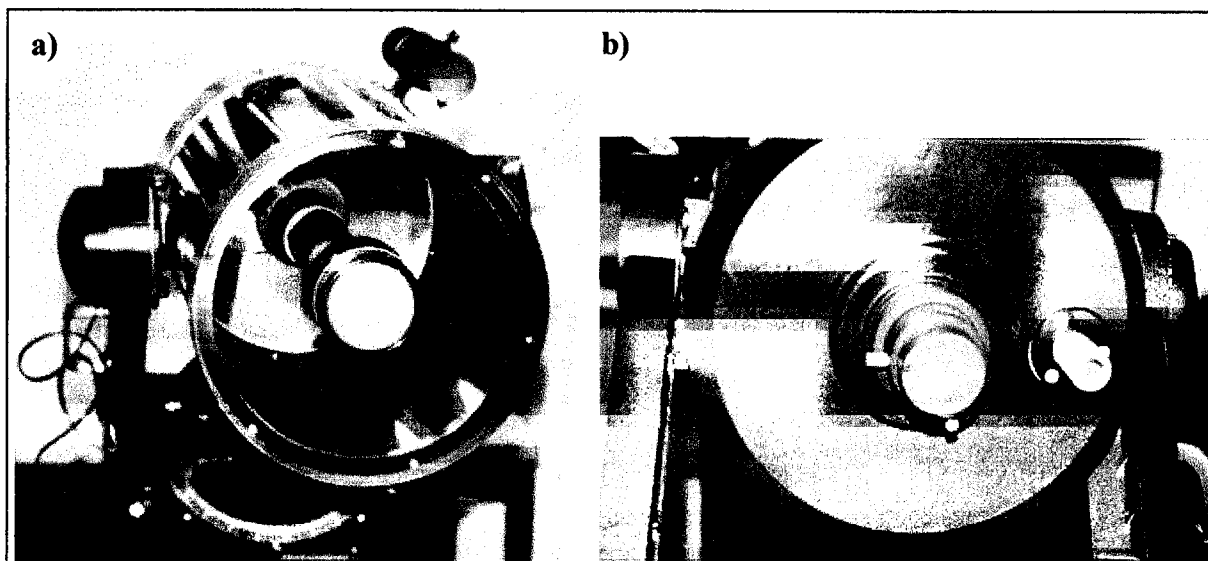


Figura 5.4 – Aspecto frontal, a), e posterior, b), do telescópio “CELESTRON CELESTAR 8”

Conforme sugerido na figura 5.5, a montagem da lente ocular realiza-se por meio de um anel adaptador, designado por porta-oculares e mostrado montado na

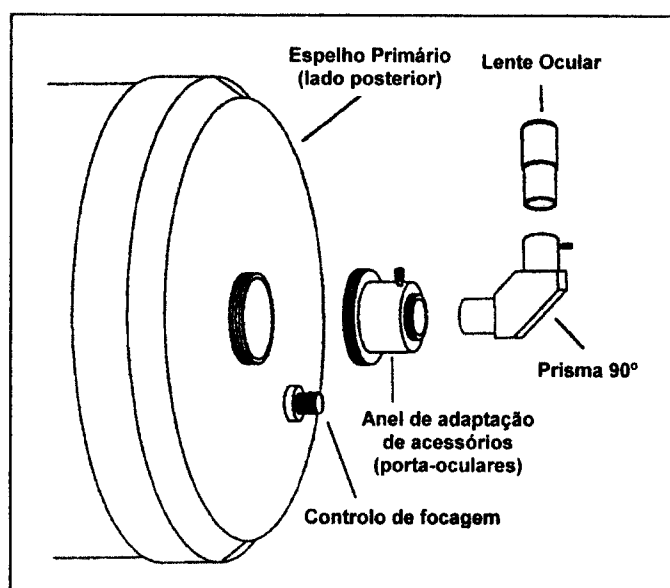


Figura 5.5 – Montagem da lente ocular na parte posterior da abertura central do espelho primário.

figura 5.4 b), com diâmetro interior de 1 ¼ polegadas, o que constitui valor normalizado nas lentes oculares. Opcionalmente, pode ainda ser intercalado um prisma de 90° (designado por “star diagonal” no manual de utilização [Ref. 11]), destinado a melhorar a comodidade na observação visual, para determinadas posições do tubo óptico, tornando-se a sua utilização imprescindível quando se pretende observar objectos com declinações próximas dos 90°, em virtude do tubo ficar paralelo aos braços de suporte, não permitindo o posicionamento do observador.

Em observação astronómica, seja visual, ou com equipamento de detecção, procura-se captar a energia da radiação luminosa colectada pelo telescópio. Tanto o olho humano, como as películas fotográficas, ou os “chips” CCD, constituem detectores de energia da radiação electromagnética incidente, que colectada pelo telescópio é concentrada no seu plano focal, onde se coloca a superfície detectora. O fluxo de energia incidente, F_0 (que depende da luminosidade intrínseca do objecto observado e da distância a que se encontra) e a energia captada, E_{capt} , relacionam-se por:

$$E_{\text{capt}} = F_0 \cdot A \quad (5.1)$$

onde A representa a área colectora. Para superfícies de geometria circular, virá $A = \pi \cdot D^2 / 4$, em que D é o diâmetro ou abertura do telescópio, pelo que:

$$E_{\text{capt}} = (\pi / 4) \cdot F_0 \cdot D^2 \quad (5.2)$$

Deste modo, a fim de maximizar a energia colectada (proporcional ao quadrado da abertura do telescópio), há todo o interesse em observar com telescópios de grande abertura. Contudo, maiores aberturas implicam maior peso e volume do sistema e maior complexidade do suporte mecânico, tornando o equipamento mais oneroso e de difícil transporte.

Conforme referido a energia colectada pelo telescópio será concentrada, no plano focal. Em observação óptica, a lente ocular projecta essa energia sobre a superfície sensível do olho humano – a pupila. Supondo que toda a energia colectada no telescópio (E_{capt}) telescópio atinge a pupila, será:

$$E_{\text{det}} = (\pi / 4) \cdot F_{\text{det}} \cdot d^2 = E_{\text{capt}}$$

e, portanto:

$$\frac{F_{\text{det}}}{F_0} = \left(\frac{D}{d}\right)^2 \quad (5.3)$$

onde E_{det} representa a energia detectada na pupila, correspondente ao fluxo incidente F_{det} , e d o respectivo diâmetro. Introduzindo a escala de grandezas de Pogson¹, virá:

$$m_{\text{det}} - m_0 = -2,5 \cdot \log\left(\frac{F_{\text{det}}}{F_0}\right) = -2,5 \cdot \log\left(\frac{D}{d}\right)^2 \quad (5.4)$$

$$m_0 - m_{\text{det}} = 5 \cdot \log\left(\frac{D}{d}\right)$$

em que m_{det} é a grandeza correspondente ao fluxo F_{det} detectado na pupila e m_0 a grandeza correspondente ao fluxo incidente F_0 . Em virtude da pupila humana tem por limiar de sensibilidade o fluxo correspondente à grandeza 6, e considerando $d = 8$ mm como valor típico, será $m_{\text{det}}=6$ e a grandeza limite m_{lim} , correspondente ao fluxo mínimo detectável pelo sistema telescópio – ocular – olho humano, vem dada por:

$$m_{\text{lim}} = 6 + 5 \cdot \log\left(\frac{D}{8}\right) = 1,48 + 5 \cdot \log D, \quad (5.5)$$

onde D é a abertura do telescópio em milímetros. Para o sistema em apreço, o valor teórico assim calculado, virá $m_{\text{lim}} \approx 13$. Como a transmissão óptica não é perfeita, perdendo-se energia no processo, as condições atmosféricas existentes durante a observação não ideais e sensibilidade visual dependente de cada observador, pode-se considerar que o sistema analisado oferece um limiar de detectabilidade real até à grandeza 12.

De menor importância que os resultados anteriores, mas de interesse em observação visual, o parâmetro ampliação angular ou poder ampliador, ω , define-se, a partir do esquema da figura 5.6, por:

$$\omega = \frac{\alpha_c}{\alpha_c'}$$

¹ Escala de Grandezas das estrelas: Cerca de 120 A.C., Hipparcos catalogou cerca de 1000 estrelas, classificando-as conforme o brilho, numa escala de 1 (as mais brilhantes) a 6 (as mais tênues detectadas pelo olho humano). Procurando uma escala mais rigorosa e menos empírica, Pogson, no sec. XIX, propôs a adaptação da escala de Hipparcos, considerando que esta se revelava não linear, mas aproximadamente logarítmica, e que o brilho, em rigor o fluxo observado, de uma estrela de 1ª grandeza era cerca de 100 vezes maior que o de uma de 6ª grandeza. Assim: $b_i / b_{i+1} = a$, $b_1 / b_6 = 100 \Rightarrow a = 10^{2/5} \approx 2,5$ e $m - n = -2,5 \cdot \log_{10}(b_m / b_n)$

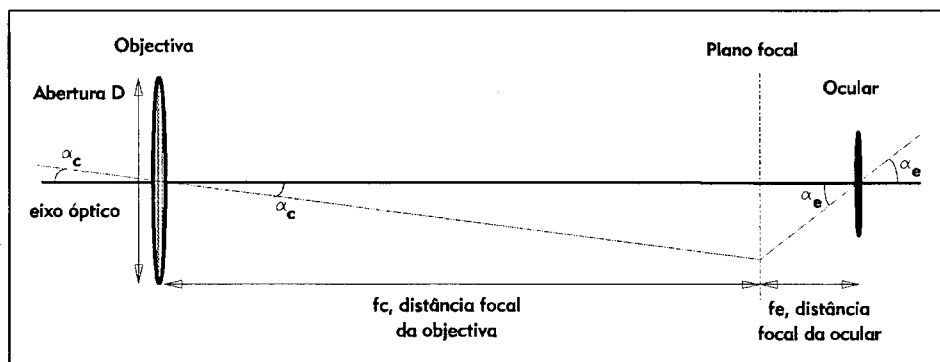


Figura 5.6 – Poder ampliador ou ampliação angular ω , de um sistema telescópico-ocular.

Nas condições da figura, será:

$$f_c \cdot \text{tg}(\alpha_c) = f_e \cdot \text{tg}(\alpha_e) \Rightarrow f_c \cdot \alpha_c \approx f_e \cdot \alpha_e$$

considerando $\alpha_c, \alpha_e \ll 1$ rad, e portanto:

$$\omega = \frac{\alpha_e}{\alpha_c} = \frac{f_c}{f_e}, \quad (5.6)$$

No sistema em análise, com uma ocular de 25 mm de distância focal montada, o poder ampliador conseguido será de 80x ($\omega = 2000 / 25 = 80$).

Em observação com equipamento detector, importa conhecer a concentração de energia por unidade de área e de tempo – Iluminação, I , que se obtém no plano focal onde se encontra montado o detector. Sendo F_0 o fluxo de radiação que chega ao telescópio, pode-se provar que:

$$I = \left(\frac{\pi}{4}\right) F_0 \cdot \left(\frac{D}{f_c}\right)^2 = \left(\frac{\pi}{4}\right) F_0 \cdot f^2, \quad (5.7)$$

introduzindo a grandeza razão focal $f = F_c / D$. Deste modo, pode-se concluir que a concentração de energia por unidade de área e de tempo, depende do brilho aparente da fonte e da razão focal existente na montagem. A energia detectada no detector será agora $E_{\text{det}} = \text{Iluminação} \times \text{Área do detector} \times \text{Tempo de exposição}$, o que evidencia a relação entre tempo de exposição e razão focal do telescópio.

A maior grandeza detectável pelo sistema, depende agora do limiar de detectabilidade do detector, da razão focal e do tempo de exposição utilizado na detecção.

Nas figuras 5.2 e 5.4 a) pode ser observado o buscador (“finder”), montado paralelamente ao tubo óptico, consistindo numa pequena luneta com 30 milímetros de abertura e ampliação angular de 6 vezes (ou 6 x 30 como usualmente é especificado pelos fabricantes de lunetas e binóculos). Este dispositivo revela-se indispensável nos procedimentos de pesquisa e selecção do objecto-alvo e respectivo posicionamento no campo de visão da ocular. Na realidade o campo de visão que se obtém na ocular do telescópio é muito reduzido (tipicamente 0,5°, no telescópio em análise, com uma lente ocular de 25 mm de distância focal), tornando-se praticamente impossível pesquisar e apontar o telescópio a um determinado alvo. O buscador, apresentando um campo de visão de cerca de 7°, permite pesquisar uma zona do céu mais alargada e apontar com precisão um determinado objecto, visto ser dotado de uma mira em forma de retículo. Será apenas necessário ajustar a posição do buscador sobre o telescópio (para o efeito existem três parafusos de ajuste), de modo a que o centro do seu retículo corresponda exactamente com o centro do campo de visão da ocular, o que pode ser facilmente conseguido apontando a um objecto terrestre distante à luz do dia. Convém notar que a imagem obtida no buscador é invertida. É ainda conveniente rodar ligeiramente a ocular do buscador, até as linhas do retículo coincidirem com os movimentos do telescópio nos seus eixos (declinação e ascensão recta). Deste modo, desde que o operador esteja suficientemente treinado e familiarizado com as características descritas, é possível utilizar o buscador na pesquisa e posicionamento sobre objectos ténues, não detectáveis à vista desarmada, explorando cartas do céu.

O quadro seguinte resume as características ópticas do telescópio em estudo.

Telescópio	CELESTRON CELESTAR 8 poleg.
Tipo montagem óptica	Schmidt – Cassegrain
Abertura	$D = 8 \text{ pol} = 203 \text{ mm}$
Distância focal	$F_c = 80 \text{ pol} = 2032 \text{ mm}$
Razão focal	$f = F_c / D = 10 \quad f/10$
Resolução	$\alpha(") = 0.68" \quad \alpha(") = 1.22 \times 206265 \times \lambda / D = 0.68" \text{ com } \lambda = 5400\text{Å}$
Oculares / Ampliações	$F_e = 25 \text{ mm} \Rightarrow m = 80x \quad F_e = 15.5 \text{ mm} \Rightarrow m = 131x$
Limiar detectabilidade	$m \leq 12$, no óptico

5.1.2. Tipo de Montagem e Subsistema Mecânico:

Operar um telescópio em observação requer que o tubo óptico seja montado num suporte estável e sólido que o sustente firmemente, sem estar sujeito a vibrações, e simultaneamente, que permita movimentar livremente o tubo óptico, segundo dois eixos perpendiculares entre si, de modo a poder ser apontado ao alvo pretendido. De acordo com a figura 5.7, qualquer direcção do espaço pode ser apontada por variação dos ângulos φ e ϕ , o que corresponde a realizar rotações segundo o eixo x e z respectivamente.

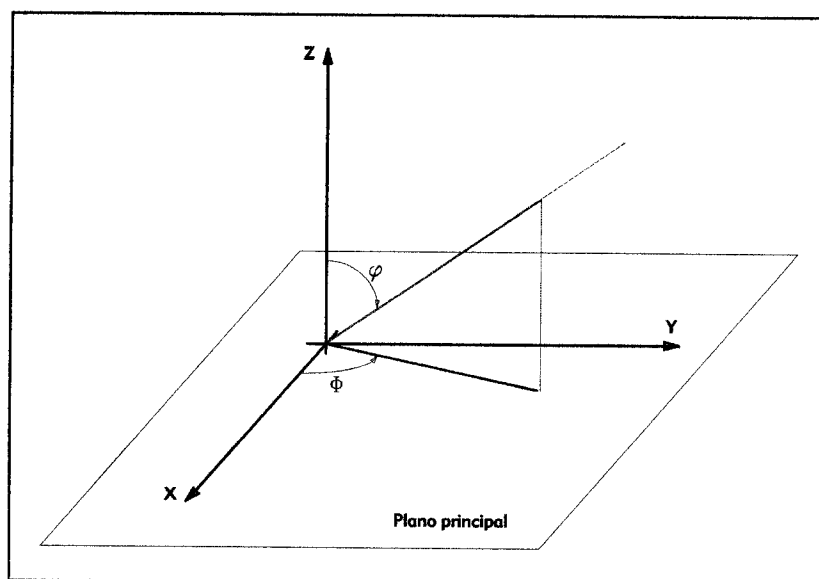


Figura 5.7 – Apontar a determinada direcção do espaço, consiste em efectuar rotações segundo dois eixos perpendiculares entre si.

Uma boa montagem deve ainda ser dotada de dispositivos mecânicos destinados à correcção micrométrica da posição da estrutura, de modo a realizar o ajuste fino de pontaria ao alvo. Na realidade, de acordo com a figura 5.6 e expressão (5.6) será $\alpha_e = \omega \cdot \alpha_c$, ou seja, qualquer desvio ou vibração de amplitude α_c , será ampliada na ocular pelo factor ω , poder ampliador da óptica.

Por outro lado, devido ao movimento de rotação da Terra, os alvos astronómicos não estão estáticos!. De acordo com a figura 5.8, será:

$$\alpha = \beta \cdot \cos \delta, \quad \text{com } \beta = \Delta H \quad (5.8)$$

Completando-se um período de rotação em 24 horas, tem-se:

$$\frac{2 \cdot \pi}{\Delta H} = \frac{24 \times 3600}{\Delta t} \quad (5.9)$$

pelo que se conclui:

$$\Delta H = \beta(\text{rad}) = \frac{\pi \cdot \Delta t(\text{s})}{12 \times 3600} \Rightarrow \quad (5.10)$$

$$\beta(") = \frac{206265}{12 \times 3600} \cdot \pi \cdot \Delta t(\text{s}) = 15 \cdot \Delta t(\text{s})$$

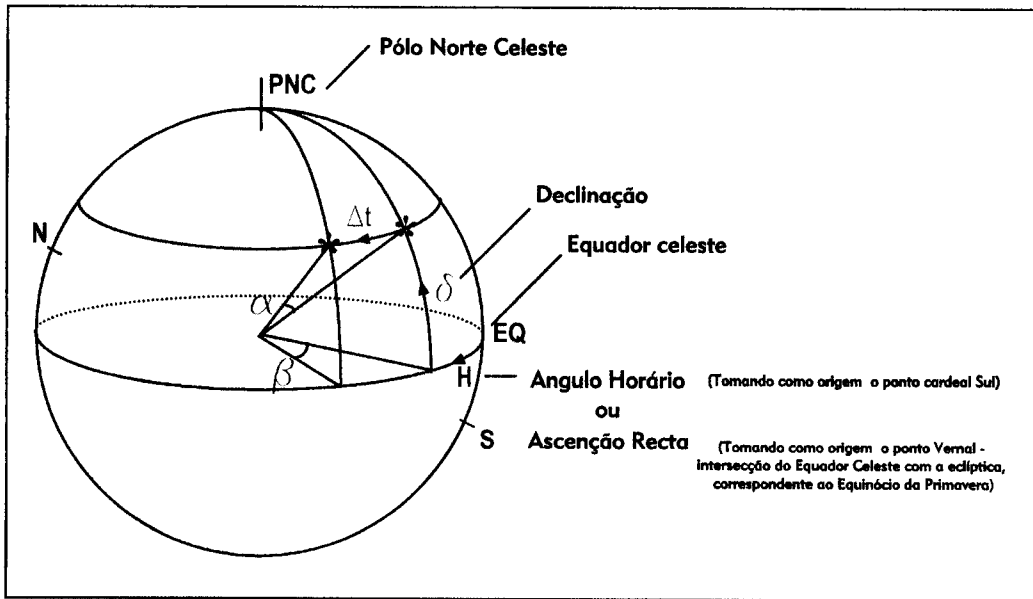


Figura 5.8 – O movimento aparente dos objectos astronômicos, consequência do movimento de rotação da Terra.

Consequentemente, tendo o objecto descrito aparentemente o arco α no intervalo de tempo Δt , a velocidade angular do movimento aparente do objecto será:

$$\alpha(") = 15 \cdot \Delta t(\text{s}) \cdot \cos \delta \Rightarrow \frac{\alpha(")}{\Delta t(\text{s})} = 15 \cdot \cos \delta \quad (5.11)$$

Objectos no Equador Celeste ($\delta = 0$) deslocar-se-ão à velocidade angular de $15''/\text{s}$, percorrendo a totalidade do campo visual de uma ocular ($30'$ típico) em 2 minutos e utilizando detectores CCD, com campos de visão da ordem de $10'$, em cerca de 40 segundos.

A discussão anterior, conjuntamente com o facto de em observação com equipamentos detectores ser necessário manter fixa a posição da imagem na superfície detectora, durante o tempo de exposição, obriga que o sistema mecânico seja dotado de um qualquer processo de compensação do movimento de rotação da

Terra, permitindo seguir um objecto por tempo indeterminado – Sistema de Seguimento (ou “tracking”).

O processo mais simples de obter esse efeito consiste em montar o tubo do telescópio segundo uma montagem equatorial, de modo a um dos seus eixos de liberdade ser perpendicular ao plano equatorial e motorizando com motor de relógio de 24 horas de período e sentido de rotação oposto ao do movimento da Terra. Uma montagem equatorial consiste, portanto, em utilizar como plano principal (ver figura 5.7) o plano do Equador, de modo ao eixo z (eixo polar ou horário) apontar para o Pólo Norte Celeste, enquanto o eixo x (eixo de declinação) existe sobre o plano principal. A rotação segundo o eixo polar permite variar a ascensão recta, enquanto a rotação segundo o eixo de declinação faz variar a declinação.

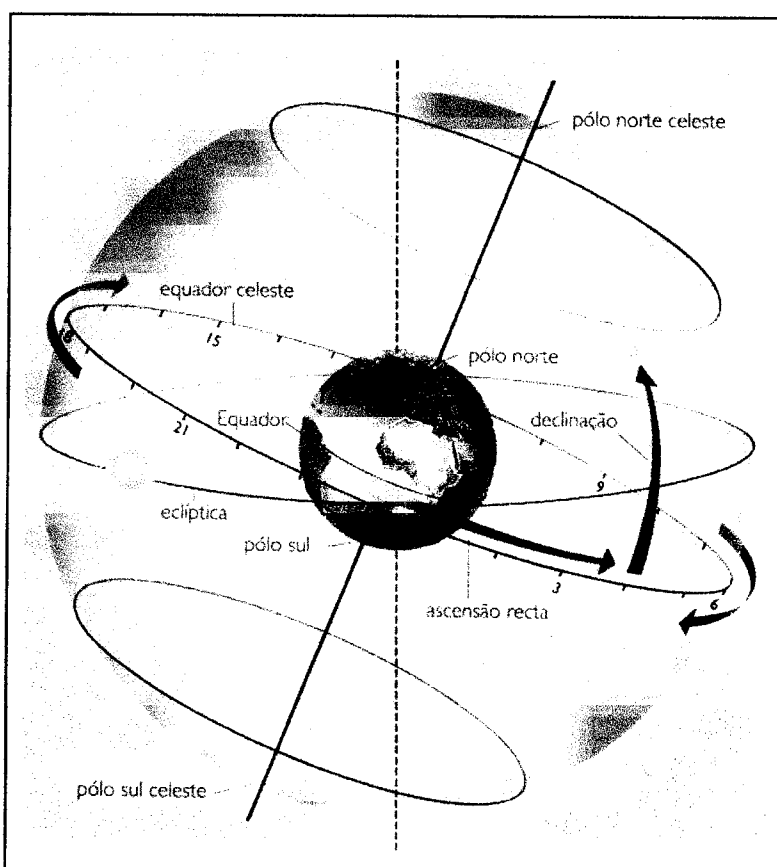


Figura 5.9 – Sistema de Coordenadas Equatoriais

A figura 5.9 ilustra o Sistema de Coordenadas Equatoriais (adaptado de [Ref. 10]), no qual esta montagem se baseia e a figura 5.10 mostra duas possíveis concretizações - montagem alemã e em forquilha. Relativamente à montagem em forquilha, do tipo do equipamento em estudo, a figura 5.11 pormenoriza a instalação e orientação no local do telescópio.

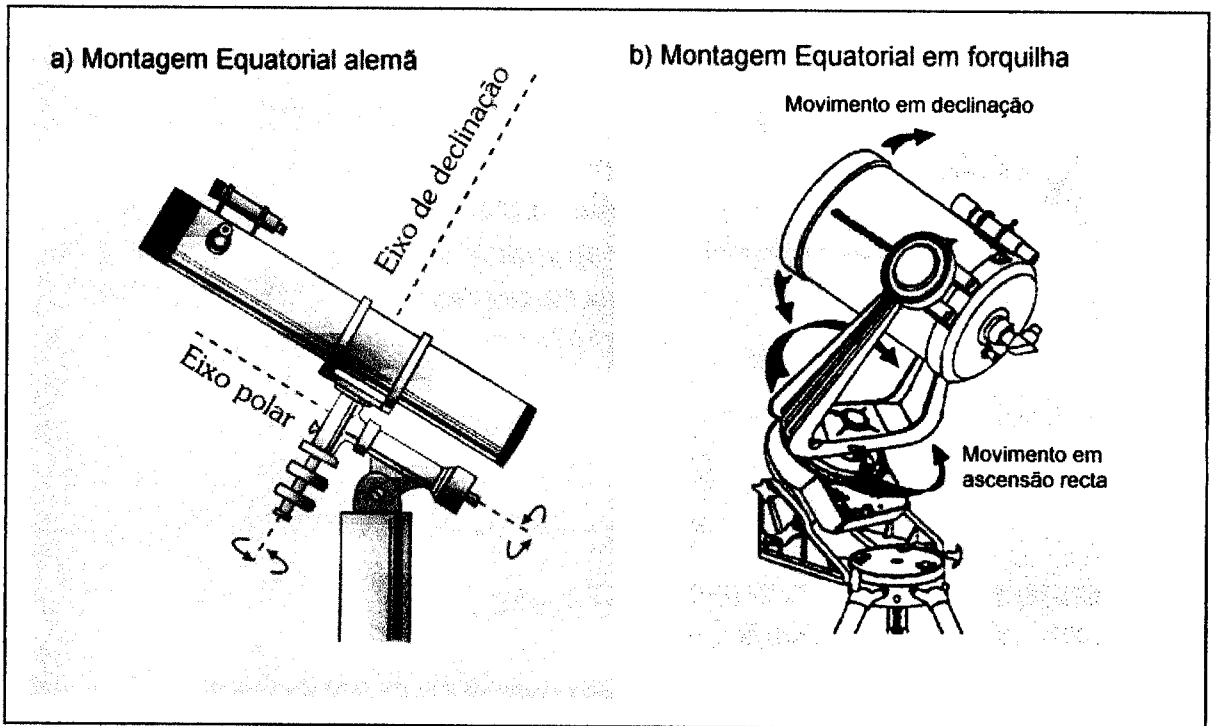


Figura 5.10 – Duas possíveis concretizações da montagem equatorial: a) Alemã; b) Em forquilha.

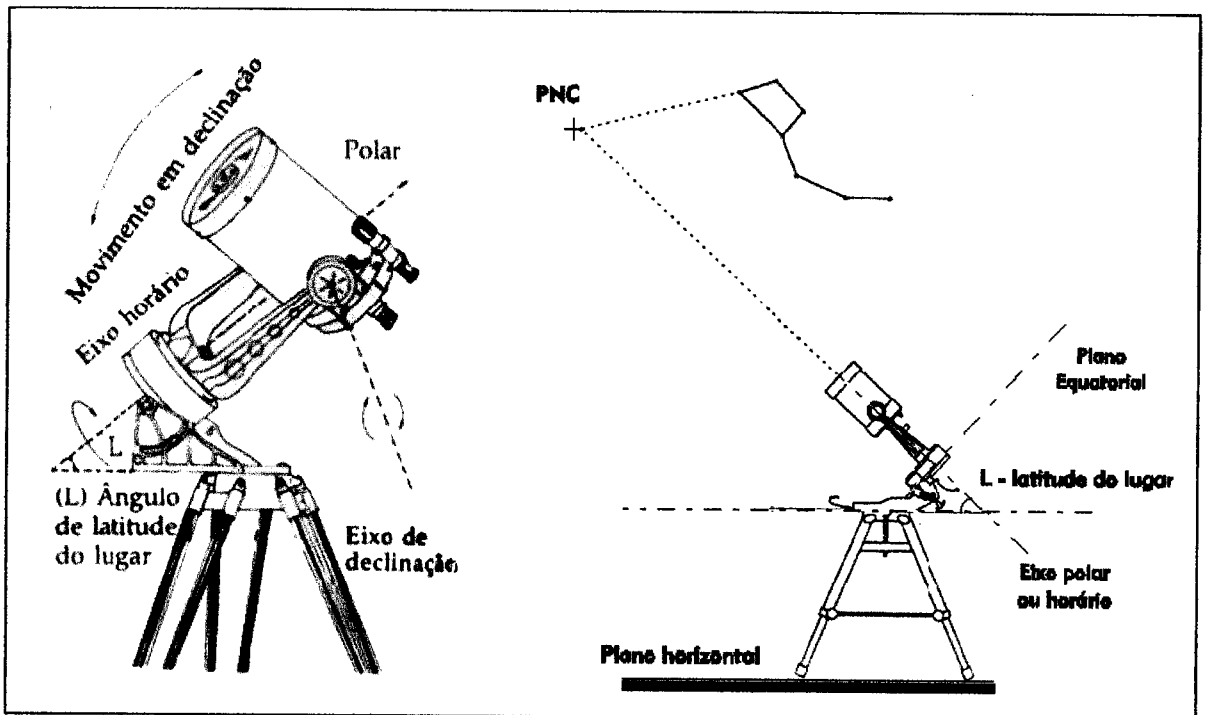


Figura 5.11 – Telescópio de forquilha instalado e devidamente orientado para montagem equatorial.

Conforme mostra a figura 5.11 e de acordo com o esquema da figura 5.12, posicionar, num qualquer local, o plano principal da montagem segundo o plano equatorial, consiste em:

- inclinar o plano principal da montagem, relativamente ao plano horizontal, de um ângulo complementar ao da latitude do local;
- orientar esse plano de modo ao seu eixo perpendicular (eixo polar) apontar para o Pólo Norte Celeste (PNC).

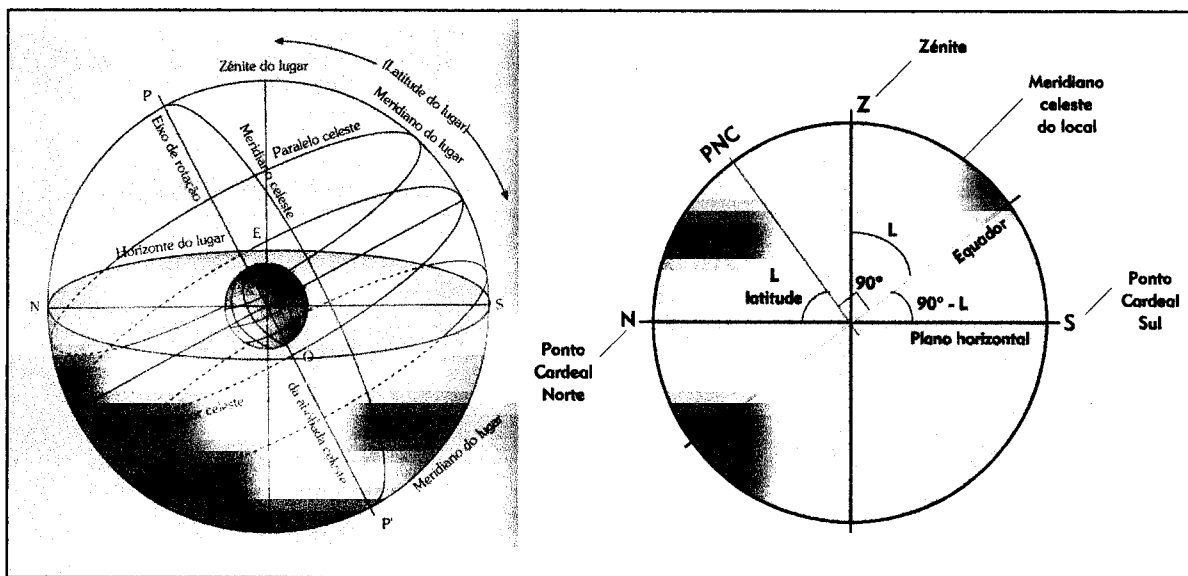


Figura 5.12 – Relação entre as coordenadas equatoriais celestes e horizontais locais.

O primeiro aspecto acima referido é obtido pela regulação de um ajuste que, para o efeito, a base de montagem do telescópio possui, como mostrado na figura 5.13. O segundo aspecto, consiste no procedimento de alinhamento polar descrito na subsecção seguinte.

Como decorre do exposto, a precisão do funcionamento do sistema de seguimento depende do rigor da orientação do telescópio, como em seguida se verá.

Relativamente à figura 5.13 convém referir os comandos do sistema mecânico disponíveis para o procedimento de apontar ao objecto-alvo. Assim, uma primeira aproximação à direcção desejada é obtida com os eixos do telescópio em movimento livre (parafusos de travamento soltos), rodando o tubo óptico. Conseguida uma direcção próxima da desejada, os movimentos dos eixos são travados, obtendo-se o ajuste fino final segundo o eixo de declinação, por meio de um parafuso de passo milimétrico para o efeito existente. Para ajuste do eixo de ascensão recta é necessário destravar o respectivo travamento antes de actuar no parafuso de ajuste fino correspondente. Tal deve-se ao facto do parafuso de travamento funcionar como embraiagem da transmissão do movimento do motor ao

eixo, sendo conveniente desengatá-la ao proceder a ajustes finos, a fim de evitar forçar o motor e rodas dentadas associadas.

O fabricante do equipamento oferece, como opção, a possibilidade de aquisição de um motor que permite motorizar o eixo de declinação. Desse modo é possível controlar o ajuste fino da pontaria por intermédio de um comando eléctrico (comando manual opcional, mostrado na figura) sem tocar na montagem, o que se revela importante em operação com dispositivos detectores, pois evita as vibrações mecânicas inevitáveis quando do manuseamento directo dos comandos.

O motor de seguimento e respectivo sistema de transmissão encontram-se encerrados na base da montagem, sendo aquele alimentado electricamente por uma pilha de 9 Volts.

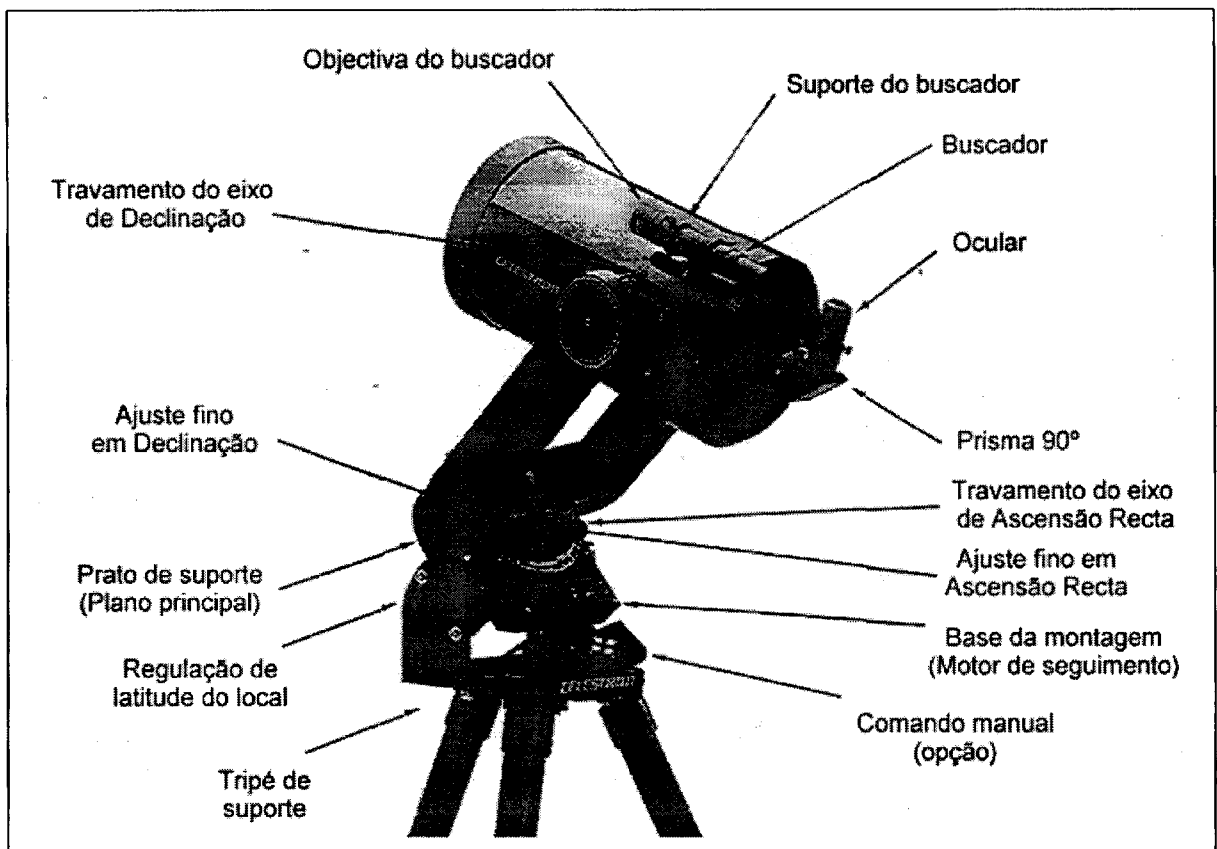


Figura 5.13 – Telescópio “CELESTRON – CELESTAR 8”- sistema mecânico e respectivos comandos e ajustes.

5.1.3. Técnicas de Alinhamento Polar:

Conforme referido na secção anterior, seguir com precisão o movimento aparente dos astros implica um procedimento rigoroso de orientação do telescópio em observação, de modo a conseguir uma compensação exacta do movimento de rotação da Terra, sendo tal condição necessária para garantir um posicionamento estático da imagem do objecto-alvo no campo de visão de um detector.

Obter o alinhamento preciso dos eixos do telescópio com os planos de referência – Alinhamento Polar ou Colocação em Estação, consiste em garantir o exacto paralelismo entre o eixo de rotação da Terra e o eixo de rotação do motor de seguimento (eixo polar ou horário), existindo para tal vários procedimentos de grau de dificuldade e precisão crescentes, que se irão descrever.

A observação visual em actividades pedagógicas de divulgação da Astronomia, apenas requer um alinhamento de baixa precisão, que, contudo, constitui uma primeira aproximação e ponto de partida de procedimentos mais elaborados e rigorosos. Baseia-se no buscador e requer que este tenha sido previamente alinhado com o eixo óptico do telescópio. Consiste em:

- Montar o tripé de suporte num local plano;
- Colocar o telescópio no tripé e orientar toda a montagem de modo ao seu eixo polar apontar para Norte (eixo que passa no centro do prato de suporte e é paralelo aos braços do garfo que suportam o tubo óptico). A direcção Norte pode ser obtida por uma bússola magnética ou, melhor, identificando a estrela polar (Polaris - Ursa Minor; α Umi) no céu, de acordo com o mapa da figura 5.14;
- Ajustar a inclinação do prato de suporte relativamente ao plano horizontal, de acordo com a latitude do local de observação. Existe uma escala de referência de latitudes junto do suporte regulável do prato. Caso seja necessário, a execução deste procedimento requer uma chave sextavada própria para afrouxar os quatro parafusos de apoio. Enquanto os parafusos de apoio estiverem frouxos, a inclinação do prato pode ser regulada, tomando a precaução de segurar firmemente o tubo do telescópio, visto este ter tendência a cair em direcção ao observador;

- Rodar o tubo do telescópio segundo o eixo de declinação até ficar paralelo aos braços do garfo que o suportam. A escala de declinações existente sobre um dos apoios deve indicar 90° ;
- Rodar a montagem, incluindo tripé, lateralmente em azimute até a estrela Polar aparecer no buscador. Caso não seja possível, e havendo a garantia de que o buscador se encontra bem alinhado, é necessário reajustar a inclinação do prato de suporte. Refinar a posição da montagem em azimute até a estrela polar se encontrar centrada no buscador e no centro da ocular. Note-se que a posição do tubo do telescópio exige a montagem de um prisma de 90° para que se consiga observar a estrela polar. Quanto menor for a distância focal da ocular, maior será a ampliação e menor o campo de visão, permitindo um ajuste mais sensível e preciso;
- Ligar o motor de seguimento e testar o alinhamento da montagem numa estrela localizada a Sul, próxima do Equador Celeste (declinação 0°), pela razão focada na expressão (5.11). Se a estrela se mantiver aproximadamente fixa no campo de visão de uma ocular de elevada ampliação, então o procedimento foi bem sucedido.

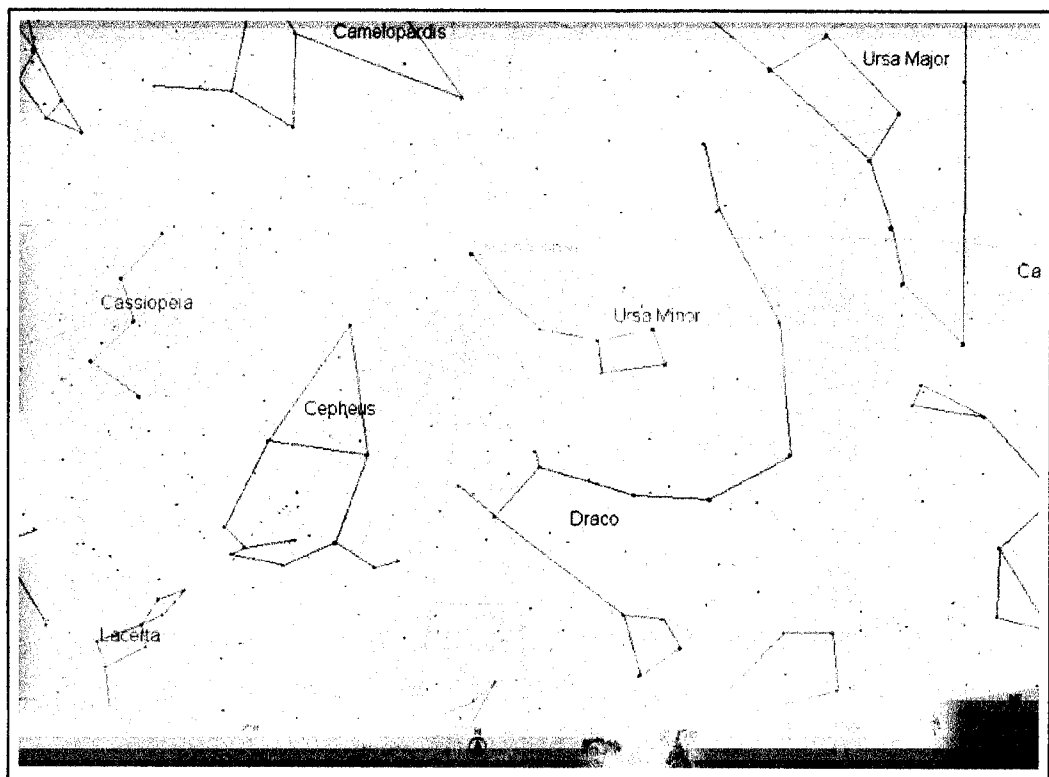


Figura 5.14 – Mapa celeste da região relativa ao ponto cardinal Norte. É possível identificar a estrela polar a partir das constelações Ursa Major ou Cassiopeia, mais facilmente reconhecíveis.

O método descrito constitui apenas uma grosseira aproximação ao alinhamento polar preciso, em virtude da estrela polar não estar exactamente sobre o Pólo Norte Celeste, PNC (declinação=90°, ascensão recta indeterminada), apresentando as coordenadas:

declinação = + 89° 15'

ascensão recta = 2 h 32 mn

Conforme mostra a figura 5.15, torna-se necessário compensar a diferença de 45' = 3 / 4 °, existente em declinação entre a estrela polar e o PNC. Tal compensação consiste em repetir o procedimento anterior, tomando como alvo não a estrela polar, mas sim o PNC, o que corresponde a colocar a imagem da estrela polar num ponto determinado do campo de visão do buscador, diferente do centro.

A distância a que deve ser colocada a imagem da estrela do centro do retículo, pode ser inferida desde que se conheça a medida do campo de visão do buscador: assim, no caso particular em análise, com um campo de visão de 7° de diâmetro, a imagem da estrela deve ficar a cerca de 1 / 4 da distância entre o centro do retículo e a periferia do campo (3,5° / 4 ≈ 0,8°). Idealmente o retículo da ocular do buscador deveria possuir um conjunto de miras circulares concêntricas, aferidas em graus, permitindo maior precisão neste processo e constituindo precioso auxílio nos procedimentos de pesquisa e posicionamento sobre objectos ténues descrito na secção 5.1.1. Contudo é também possível adquirir alguma sensibilidade da escala da imagem no campo de visão do buscador, com algum treino de observação de estrelas próximas, cuja distância angular seja conhecida.

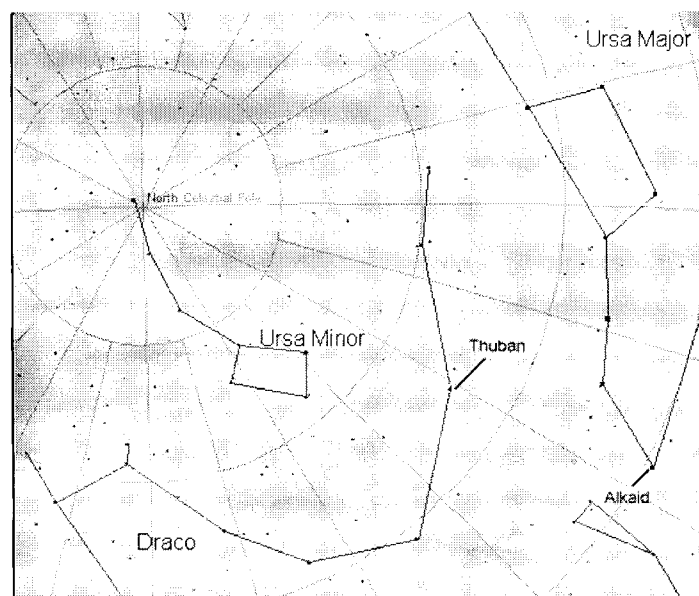


Figura 5.15 – Posição relativa entre a estrela polar e o PNC.

Falta conhecer a direcção da compensação referida. Na realidade, a estrela polar descreve um movimento circular em torno do PNC, de 24 horas de período. A exacta posição sobre essa trajectória, em cada instante, pode ser conhecida pela posição de estrelas próximas, como Thuban (Draco; α Dra) ou Alkaid (Ursa Major; η Uma), como mostrado na figura 5.15. Contudo, estas estrelas estão suficiente afastadas da estrela polar para o campo de visão do buscador não as conseguir apanhar simultaneamente. Resta inferir a direcção pretendida através da disposição existente no momento no céu e da imagem invertida do buscador. A figura 5.16 pretende ilustrar a imagem que se observaria no buscador na situação da figura 5.15. É importante que o retículo esteja alinhado com os movimentos do telescópio em altura (declinação) e azimute, conforme referido na secção 5.1.1., o que nesta posição particular corresponde às direcções Norte-Sul e Oeste-Este. Os programas de computador simuladores do aspecto da abóbada celeste (planetários), referidos na bibliografia como [Ref. 40] a [Ref. 42] podem constituir ajuda preciosa na prossecução deste procedimento.

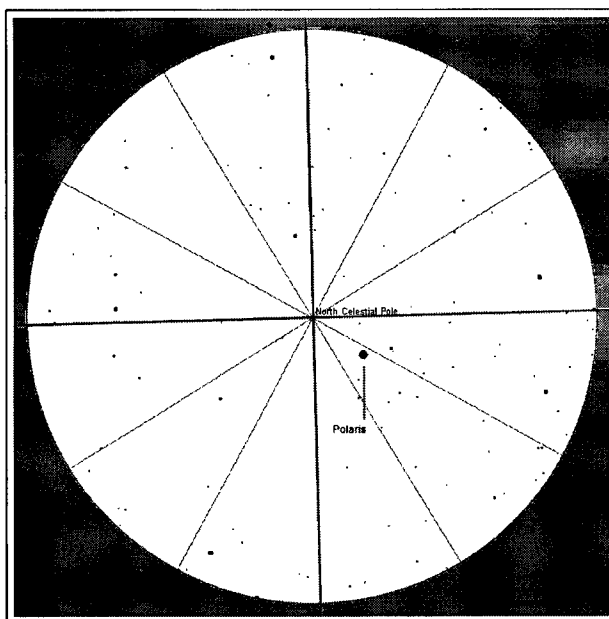


Figura 5.16 – Imagem obtida na ocular do buscador, nas condições da figura 5.15.

Conseguido este alinhamento, a precisão do mesmo pode ser testada, actuando sobre o eixo polar do telescópio (ajuste de ascensão recta). Ao variar a posição desse eixo, o PNC deve-se manter no centro do retículo, enquanto a

imagem da estrela polar irá descrever um arco circular centrado no PNC, conforme esquema da figura 5.17.

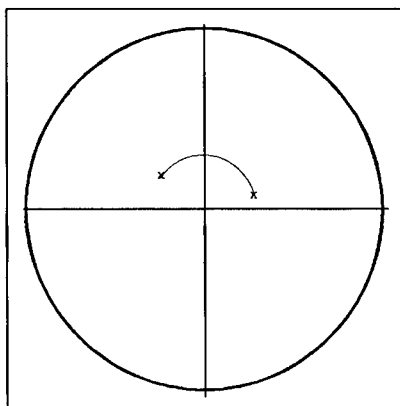


Figura 5.17 - Deriva da posição da estrela polar em torno do PNC, no campo de visão do buscador, ao rodar o eixo polar, com o equipamento em alinhamento polar.

A precisão dos procedimentos descritos está limitada pela pouca exactidão da escala de declinações existente e pela inexistência da divisão do extenso campo de visão do buscador por uma escala graduada em graus. Embora a precisão conseguida seja suficiente em actividades de observação visual, revela-se manifestamente grosseira em astrofotografia, com tempos de exposição elevados. É, então, necessário recorrer ao método da deriva em declinação, que se baseia na monitorização da deriva de estrelas no campo visual da ocular do telescópio, com o motor de seguimento em operação. Consiste na seguinte sequência de operações:

- Após a execução dos anteriores procedimentos de alinhamento, monta-se uma ocular de média / grande ampliação no porta-oculares, intercalando-se, se necessário, uma lente "Barlow" (que duplicando a distância focal da objectiva, duplica a ampliação e reduz o campo de visão a metade, como anteriormente discutido, secção 3.1.4);
- Aponta-se a uma qualquer estrela brilhante existente na direcção Sul e nas proximidades do Equador Celeste (declinação ≈ 0);
- Ajusta-se a pontaria da montagem de modo à imagem da estrela ficar no centro do retículo da ocular e liga-se o motor de seguimento; de referir a conveniência de utilização de uma ocular de retículo iluminado, consistindo numa ocular com um retículo, eventualmente com miras circulares concêntricas graduadas e iluminado electricamente; embora de extrema utilidade, revela-se um equipamento dispendioso, podendo ser substituído

por uma mira improvisada, como explicado na secção 5.2.2 (figura 5.22); a necessária iluminação pode ser obtida encostando um “LED” vermelho à lente correctora do telescópio, de modo a obter um fundo da imagem na ocular avermelhado e baço;

- Após 1 a 2 minutos, observa-se a posição da estrela, relativamente ao centro do retículo, procurando identificar deriva em declinação:
 - caso se verifique deriva na direcção Sul, então o eixo polar está demasiado virado a Oeste;
 - caso derive para Norte então a montagem está apontada demasiadamente a Este;
- Por tentativa e erro, vai-se rodando a montagem completa (incluindo o tripé) em azimute, até a deriva ser compensada;
- Em seguida escolhe-se uma outra estrela brilhante existente, na direcção Este e nas proximidades do Equador Celeste (declinação ≈ 0), necessariamente pouco acima do horizonte, repetindo-se a pesquisa de uma eventual deriva:
 - caso se verifique deriva na direcção Sul, então o eixo polar está demasiado baixo;
 - caso derive para Norte então a montagem está demasiadamente alta;
- Novamente, por tentativa e erro, vai-se ajustando a montagem em altura (latitude), até a deriva ser compensada;
- Repete-se o procedimento para as duas estrelas até haver convergência, isto é, não ser detectada qualquer deriva.

O procedimento será tanto mais rigoroso, quanto maior for a ampliação do sistema óptico e o tempo de monitorização de derivas.

A aplicação prática deste método ao sistema em análise, depara-se com várias dificuldades, fruto da inferior qualidade do sistema de suporte disponível. A experiência acumulada em diversas tentativas de aplicação do método, permitiu concluir que a convergência do processo depende criticamente dos seguintes factores:

- Nivelamento da montagem;
- Rotação fina e precisa da montagem em azimute;
- Ajuste fino em latitude.

O equipamento disponível, embora adequado a observação visual, revela-se pouco preciso em actividades de observação com detectores.

Na realidade é difícil garantir o nivelamento exacto do tripé de apoio da montagem, por não ser dotado de um nível de bolha de ar para verificação e de regulação milimétrica em altura dos pés de apoio. Tentou-se obviar esta deficiência do equipamento utilizando um nível de bolha avulso e procurando atingir um razoável nivelamento por interposição de calços entre o solo e os pés de apoio. Contudo essa técnica revelou-se de difícil aplicação, pois diminui a estabilidade da montagem, sendo preferível escolher como local de montagem uma superfície perfeitamente plana e nivelada.

Os ajustes da posição em azimute são realizados por arrastamento de toda a montagem, incluindo tripé, sendo demasiado grosseiros para o sucesso do procedimento. Idealmente, o suporte de montagem deveria permitir a rotação, segundo o eixo vertical, do prato horizontal existente no topo do tripé e que sustenta toda a montagem, permitindo uma regulação fina e milimétrica em azimute. No sentido de ultrapassar esta dificuldade pouco haverá a fazer, a não ser montar o tripé sobre uma alcatifa; os ajustes em azimute poderão ser realizados por rotação da alcatifa, arrastando a montagem solidariamente.

Finalmente o ajuste em inclinação do plano principal (dependente da latitude do lugar de observação), só pode ser realizado do modo descrito anteriormente, não permitindo ajustes finos.

Perante o exposto, a realização de astrofotografia de longa exposição, requerendo um seguimento preciso do alvo, com o equipamento analisado, constitui uma actividade de difícil prossecução. Caso se pretenda insistir na sua realização, é aconselhável tentar adquirir um suporte mais evoluído, dotado das funções e itens referidos como imprescindíveis a uma montagem de precisão (o modelo "CELESTAR 8 DELUXE" vem equipado de origem com um tripé e base de montagem melhorados). Contudo o ideal para a realização de astrofotografia de longa exposição consiste na construção de um pedestal vertical para suporte permanente do telescópio, que apenas requer uma operação precisa de alinhamento durante a sua instalação.

5.2. ACOPLAMENTO DA CÂMARA AO TELESCÓPIO

A observação astronómica com equipamentos detectores impõe que se analise atentamente as técnicas e os dispositivos disponíveis para realizar o acoplamento desses equipamentos ao telescópio. Os vários dispositivos que desempenham essa missão e respectivas técnicas de operação, que serão discutidos nesta secção, permitem um controlo efectivo do processo de aquisição de imagem, contribuindo significativamente para o sucesso e qualidade do produto final.

O acoplamento de uma câmara CCD a um telescópio requer uma adaptação mecânica própria, cujos aspectos pertinentes serão analisados na subsecção 5.2.1., destinada a garantir a estabilidade do sistema e o alinhamento do eixo óptico, permitindo um percurso óptico de qualidade entre a saída do tubo do telescópio e a superfície sensível do detector. Os aspectos relevantes do acoplamento óptico serão discutidos na subsecção 5.2.2., onde também serão analisadas as técnicas utilizadas para a pesquisa e centragem da imagem do objecto-alvo na superfície sensível de detector.

5.2.1. Adaptação mecânica:

O processo mais simples de adaptar uma câmara CCD a um telescópio consiste em terminar o corpo da câmara do lado do "chip" por um tubo de ocular, montando-a no porta-oculares como se fosse uma lente. Contudo, torna-se por vezes necessário e desejável intercalar dispositivos diversos entre a câmara e o telescópio (caso do "Flip-mirror" ou de filtros adiante discutidos), obrigando a conhecer os elementos mecânicos de encaixe disponíveis no telescópio, nos referidos dispositivos e no corpo das câmaras.

A terminação usual nas câmaras é em tubo de ocular de 1 ¼ polegadas (31,75 mm) de diâmetro, esquematizado na figura 5.18. Contudo essa peça terminal pode ser desenroscada e separada da câmara (exceptua-se o caso da câmara "QuickCam", por razões de construção), deixando a descoberto uma rosca que pode ser utilizada para promover a fixação de dispositivos com terminações adequadas ou anéis adaptadores de diferentes encaixes. Os tipos de roscas geralmente

disponíveis nos corpos das câmaras, obedecem a normalizações usuais em equipamento e acessórios fotográficos, sendo o mais comum conhecido por encaixe M42, esquematizado na figura 5.18.

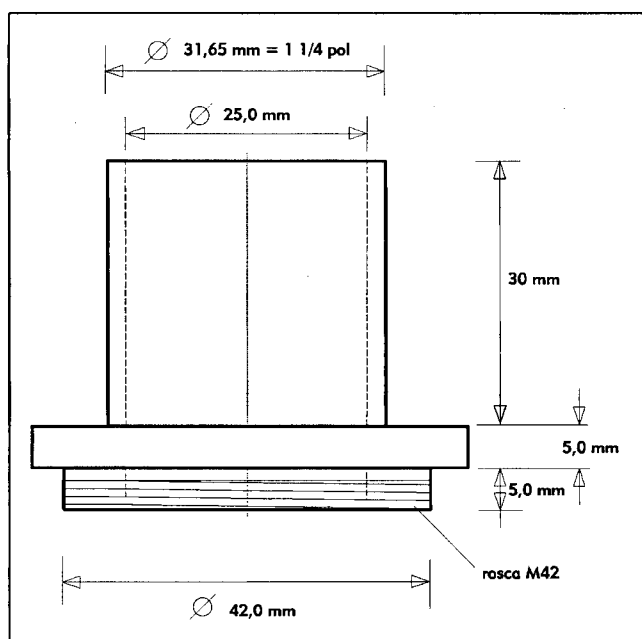


Figura 5.18 – Tubo de ocular e rosca M42.

Tanto a câmara “Starlight MX916”, como a câmara “Cookbook CB245”, vêm equipadas com roscas M42 fêmea no corpo, o que permite encaixar tubos de ocular idênticos ao esquematizado na figura 5.18, possibilitando ainda o acoplamento a outros dispositivos com encaixes do mesmo tipo. Para tal, é conveniente possuir um jogo de adaptadores M42 macho-fêmea que cubram todas as diferentes combinações possíveis:

- M42 macho – M42 macho;
- M42 fêmea – M42 fêmea;
- Extensor com roscas M42 macho e M42 fêmea nas extremidades, permitindo afastar os dispositivos quando for necessário afastar os planos focais (a câmara MX916 vem equipada com um de 2 polegadas (50,8 mm) de comprimento para permitir o acoplamento focal da câmara a uma lente objectiva fotográfica “PENTAX”);

Relativamente à câmara “Quickcam”, em virtude de estar limitada ao encaixe por tubo de ocular, foi necessário mandar executar a peça representada na figura 5.19 que realiza o acoplamento entre um tubo de ocular e uma rosca M42 fêmea.

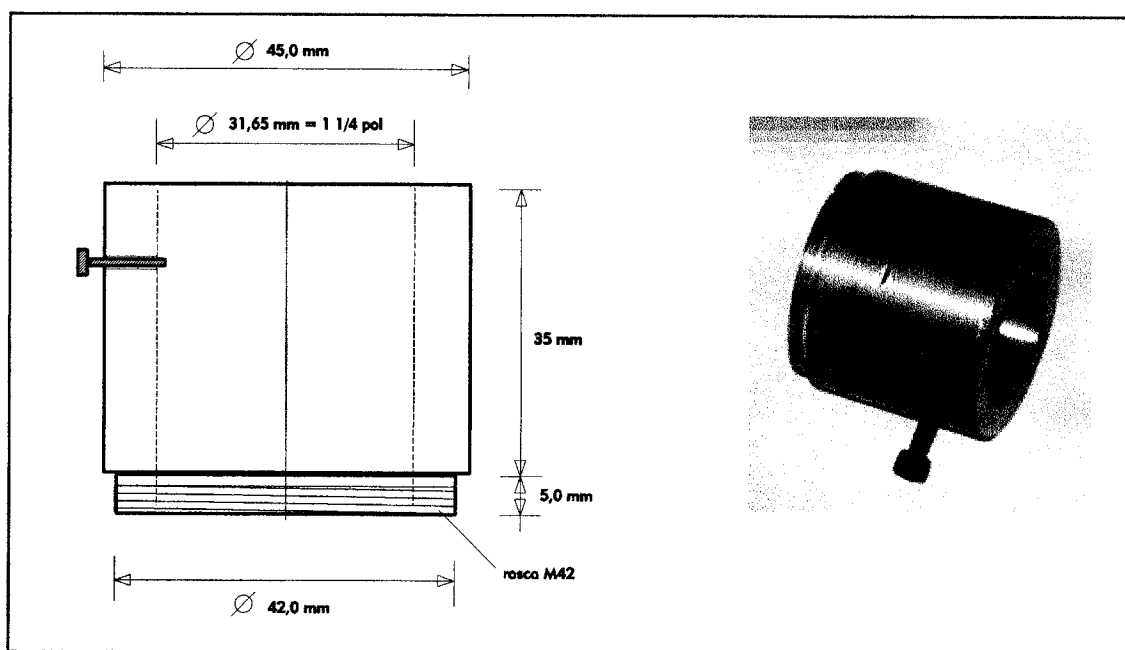


Figura 5.19 – Adaptação tubo de ocular / rosca M42 para a câmara “QuickCam”.

5.2.2. “Flip-mirror” - Pesquisa e Centragem do Objecto:

Devido às acrescidas vantagens que proporciona em operação, usualmente é intercalado entre o telescópio e a câmara CCD, um “Flip-mirror” (figura 5.20), dispositivo que, além de realizar o acoplamento mecânico, permite controlar todo o processo de aquisição de imagem.

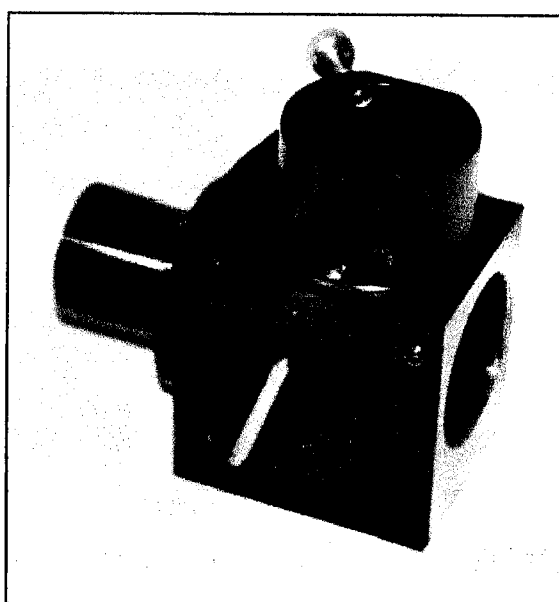


Figura 5.20 – “Flip-mirror finder” – “TRUE TECHNOLOGY, Lda”

Este dispositivo é dotado de um espelho cuja superfície de reflexão pode ser colocada de modo a formar um ângulo de 45° com o eixo óptico, reflectindo a imagem 90° (posição ↑ do manípulo) para uma ocular, ou colocado paralelamente ao eixo óptico (posição → do manípulo), não interferindo no percurso óptico. A figura 5.21 reproduz uma cópia do folheto que acompanha o modelo testado, fabricado por "TRUE TECHNOLOGY, Lda", onde se especificam os tipos de encaixe mecânico disponíveis. Com o espelho na posição ↑ permite, através de uma ocular, realizar os procedimentos de pesquisa e centragem do alvo. Com o espelho na posição → a radiação luminosa atinge directamente a superfície sensível do detector, possibilitando a aquisição de imagem. Disponibiliza, ainda um encaixe para filtros no lado do telescópio, facilidade que será discutida na secção 5.3.3..

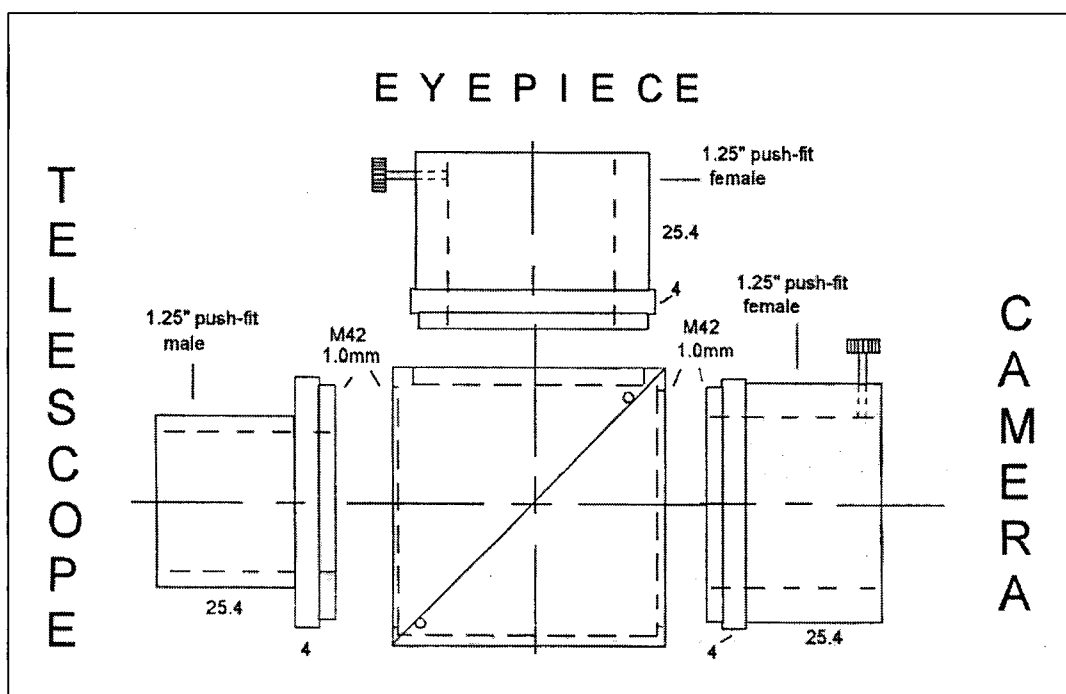


Figura 5.21 – Dimensões e encaixes do "Flip-mirror".

O interesse do "Flip-mirror" em operação é óbvio. Permite identificar e seleccionar visualmente o objecto - alvo e centrá-lo no campo de visão da ocular, utilizando os comandos finos de ajuste em ascensão recta e declinação. Como o campo de visão da ocular é relativamente maior que o do detector é conveniente utilizar uma ocular de retículo iluminado. Constituindo um equipamento dispendioso, pode ser substituído por uma mira improvisada a partir de um pequeno troço de 10 cm de cabo eléctrico unifilar de cobre, moldado em anel, sobre o qual se soldam em

cruz dois fios capilares de cobre retirados de um cabo eléctrico multifilar, como se mostra a figura 5.22, já montado numa ocular comum.

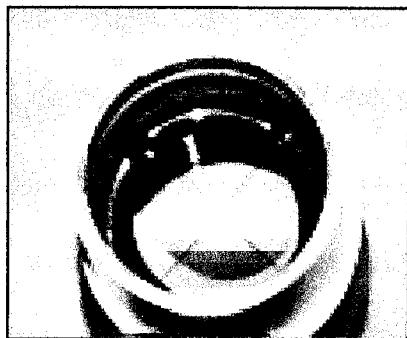


Figura 5.22 – Ocular comum com mira improvisada montada.

De modo a poder haver precisão no procedimento de centragem da imagem é conveniente assegurar a coincidência entre o centro do campo de visão do detector e o cruzamento dos eixos reticulares na ocular. Para tal, o “Flip-mirror” experimentado possui dois parafusos para ajuste da posição do porta-oculares sobre o corpo do “Flip-mirror”. Este procedimento de alinhamento dos campos deve ser sempre realizado após a montagem de todo o sistema, realizando testes de aquisições de imagens de estrelas, com a função de focagem (integrações rápidas e sucessivas da região central da área de imagem, usualmente com “binning”) do programa de controlo da câmara.

Por outro lado, e no sentido de facilitar os procedimentos de pesquisa e centragem da imagem, é aconselhável rodar a ocular montada no “Flip-mirror” de modo ao movimento da imagem se realizar segundo as direcções dos eixos reticulares, ao variar a declinação ou a ascensão recta da montagem.

Em operação de aquisição de imagem utilizando o “Flip-mirror”, particularmente em longas exposições, o fabricante aconselha cobrir o dispositivo com um pano escuro, de modo a evitar a corrupção da imagem por luz externa através da ocular ou encaixe dos filtros.

Na figura 5.23 são apresentados diferentes aspectos de um sistema de aquisição de imagem completamente montado e pronto a operar, constituído por uma câmara “Cookbook CB245” montada no “Flip-mirror” através da adaptação de tubo de ocular, descrita na figura 5.19.

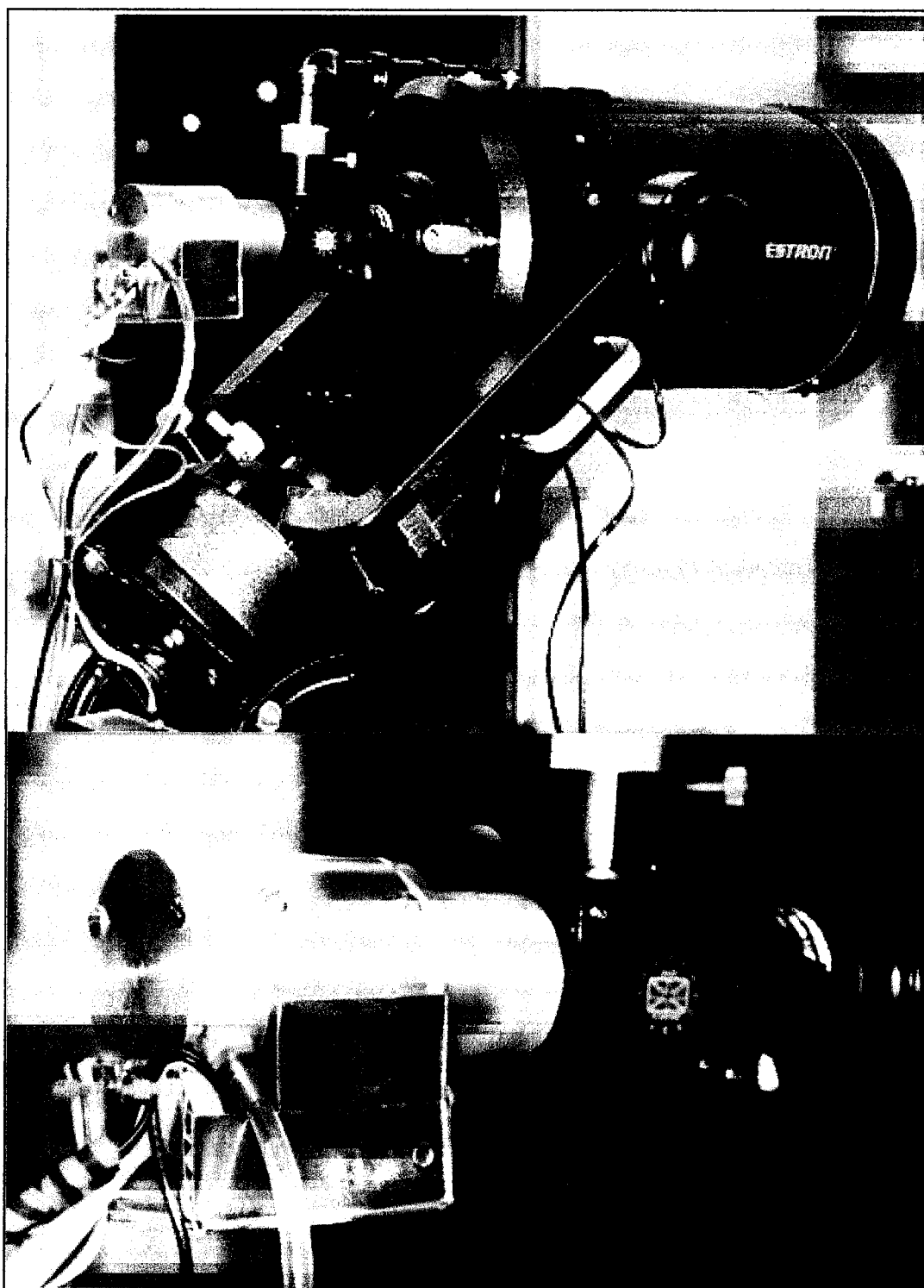


Figura 5.23 – Aspectos de um sistema de aquisição de imagem a partir da câmara “Cookbook CB245”, completamente montado e preparado para operação.

5.3. AQUISIÇÃO DE IMAGEM

Constituído o sistema de aquisição de imagem, devidamente montado e alinhado, pode ser iniciada uma sessão de aquisição de imagem astronómica.

Contudo, a fim de garantir um resultado de qualidade, é necessário dedicar algum tempo a cumprir o procedimento de focagem da imagem na superfície sensível do detector, o qual será abordado na subsecção seguinte.

A fase de integração de imagem é iniciada por comando ao programa de controlo da câmara, especificando o tempo de integração desejado, que depende do brilho do objecto – alvo. A sensibilidade necessária à decisão da quantidade de tempo de exposição só pode ser adquirida com prática, por tentativa e erro. Contudo, deve ser utilizado um intervalo de tempo tão grande quanto possível, ligeiramente inferior ao necessário para produzir saturação nos elementos mais brilhantes do campo visual. Na aquisição de objectos ténues, quanto maior for o tempo de integração, maior o sinal acumulado, sendo assim maximizada a relação sinal – ruído.

Em astrofotografia de longa exposição é importante realizar o guiamento da exposição, o que consiste em monitorizar o funcionamento do sistema de seguimento, compensando eventuais desalinhamentos da montagem ou erros intrínsecos ao motor do sistema, garantido a máxima estabilidade da imagem sobre a superfície de detecção.

Dependendo das condições atmosféricas e de “seeing” existentes no momento de observação e fundamentalmente do tipo de objecto – alvo pretendido, é frequente haver necessidade de intercalar acessórios ópticos no sistema, de modo a adaptar a resolução da imagem à configuração geométrica do “chip” detector ou à sua sensibilidade. Pelas mesmas razões, pode-se optar por recorrer a técnicas de “binning”.

5.3.1. Focagem:

A focagem consiste no posicionamento preciso do plano focal do telescópio sobre a superfície sensível do detector, ou num ponto à distância focal da ocular, no caso de observação visual. Utilizando um "Flip-mirror" para monitorização do processo de aquisição de imagem, torna-se importante obter focagem na lente ocular, indispensável para a realização dos procedimentos de pesquisa e centragem do alvo. Contudo, obter uma imagem focada na ocular não garante uma focagem correcta sobre a superfície de detecção. Por outro lado, focar visualmente, consiste num procedimento imbuído de decisões subjectivas, dependentes do observador, sem a precisão necessária a um sistema electrónico de aquisição.

Deste modo, foi testado um método prático de fácil e rápida aplicação, que se baseia na utilização de máscaras colocadas sobre a lente correctora do telescópio, como exibido nas figuras 5.24 e 5.25.

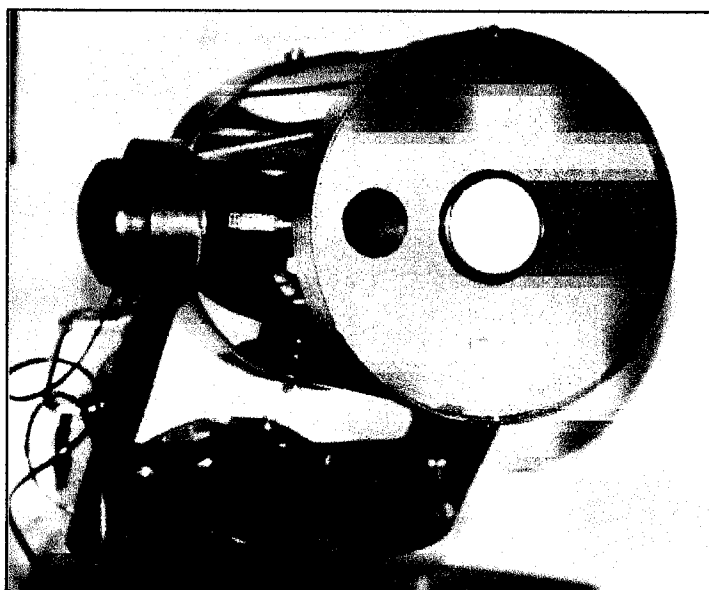


Figura 5.24 – Máscara de focagem montada no telescópio.

As máscaras de focagem são construídas em cartolina preta, recortada à medida da abertura frontal do telescópio, na qual se abrem dois orifícios diametralmente opostos. Foram testados dois protótipos com orifícios de diferente diâmetro, 40 mm e 22 mm, reproduzidos na imagem 5.25. Concluiu-se que, para este efeito, o de maiores orifícios tornava o procedimento mais eficaz, em virtude do outro atenuar demasiadamente a radiação incidente. Contudo, este revelou-se útil

para a aquisição de imagens de objectos de brilho intenso, por exemplo a Lua, como será referido em secção posterior.

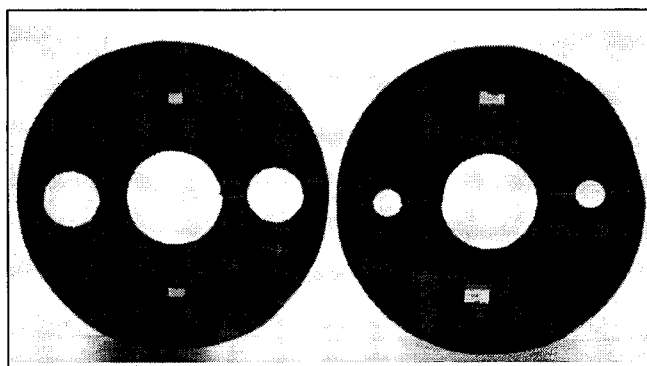


Figura 5.25 – Máscaras de focagem.

Interpondo uma destas máscaras no percurso óptico e apontando para uma estrela (não demasiado brilhante para evitar a saturação, nem demasiado tênue que deixe de ser observada devido à atenuação provocada pela máscara), podem ser observados dois pontos de luz no monitor do computador (programa de controlo na função “Focus” já referida). A focagem precisa, sobre a superfície de detecção, obtém-se fazendo convergir os referidos pontos num só!, por regulação do comando de focagem do telescópio. Atingido o ponto de focagem, convém garantir a imobilidade do comando, pelo que seria conveniente dispor de um sistema de travamento do respectivo manípulo. Teria ainda interesse, dotar o sistema de um comando eléctrico de precisão, que permitisse realizar todo o procedimento de focagem sem tocar no equipamento, em virtude do ponto de focagem se revelar muito sensível.

Realizada a focagem sobre a superfície do detector, será desejável focar também a imagem na ocular, mas sem voltar a tocar no comando de focagem, como é óbvio. Devido ao facto do acoplamento da câmara ao “Flip-mirror” ser usualmente obtido com o recurso a anéis adaptadores, a posição do plano focal depende da respectiva espessura. Regra geral, a fim de obter a focagem visual na ocular, basta ajustar verticalmente a posição da lente no porta-oculares, subindo-a ligeiramente, como se pode observar na figura 5.23.

Finalmente, concluído o procedimento de focagem, retira-se a máscara de focagem da abertura frontal do telescópio e podem ser iniciados os processos de selecção, centragem e aquisição de imagem.

Pretendendo-se mais rigor, necessário à realização de astrofotografia de elevada qualidade, pode-se recorrer a métodos electrónicos de focagem, que consistem na obtenção de imagens sucessivas de uma estrela e no tratamento analítico dos respectivos dados por um programa de computador, com o intuito de determinar a imagem mais concentrada possível da estrela, conforme especificado na figura 5.26.

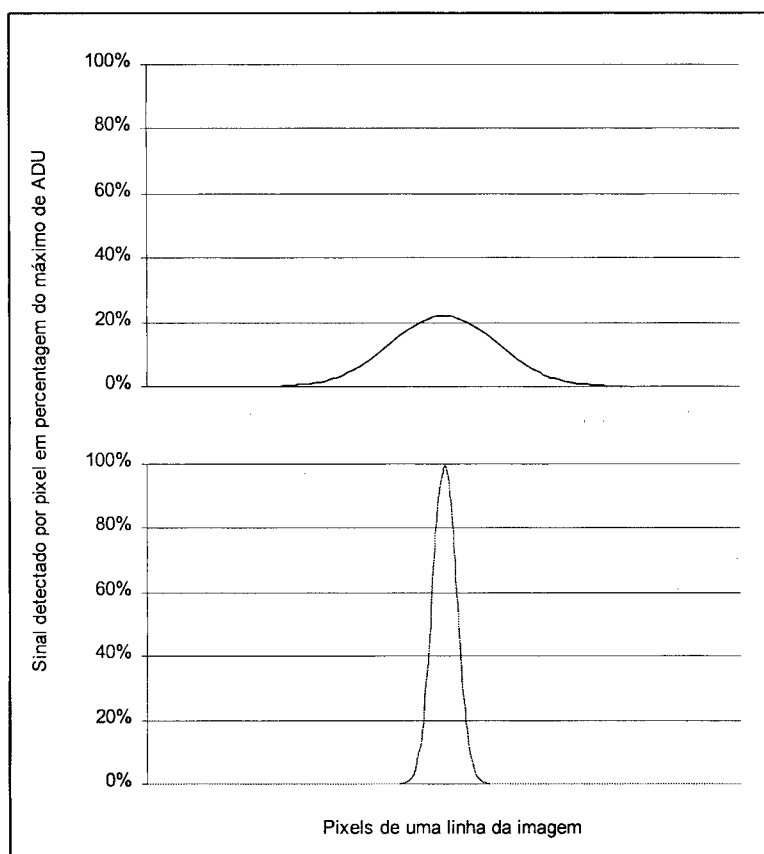


Figura 5.26 – Focagem por maximização e concentração do sinal produzido por uma estrela de referência.

Este método é de aplicação directa quando em operação com a câmara “Cookbook CB245”, visto o seu programa de controlo disponibilizar a função “Z-Focus” referida na secção 4.1.7.

5.3.2. Guiamento:

De modo a obter uma imagem nítida a partir de uma longa exposição é necessário realizar o guiamento, que consiste em manter uma estrela – guia no centro de um retículo, garantido a imobilidade da imagem sobre a superfície de detecção, enquanto durar a exposição. Para tal, enquanto se observa a estrela – guia, vai-se ajustando ligeiramente a pontaria do telescópio, em ascensão recta e declinação, compensando eventuais erros do sistema de seguimento, originados pelos seguintes factores:

- Qualquer mecanismo de seguimento produz ligeiras perturbações periódicas relativamente ao movimento uniforme pretendido – erro periódico – ocasionadas por imperfeições ou sujidade nos dentes das engrenagens ou desequilíbrio estático da montagem; este erro periódico traduz-se por ligeiros avanços e atrasos no seguimento em ascensão recta, cujo período está relacionado com o período do movimento de relógio do sistema antes da desmultiplicação final de ataque ao eixo polar;
- Eventuais imprecisões no alinhamento polar da montagem;
- Variação da refacção atmosférica com a altura do objecto – alvo, alterando a sua posição aparente;
- Flexão ligeira do tubo do telescópio durante o seguimento, devida à alteração da distribuição de carga estática nos respectivos apoios, durante o movimento;
- Eventuais flutuações da energia eléctrica que alimenta o motor de seguimento.

Em virtude da elevada precisão requerida neste procedimento, é indispensável que as necessárias correcções finas em ascensão recta e declinação sejam executadas num comando manual eléctrico, em vez de recorrer aos comandos do telescópio, a fim de evitar as vibrações associadas à sua manipulação. Para tal é forçoso dotar o eixo de declinação com motorização eléctrica, sistema fornecido pelo fabricante como acessório adicional.

A monitorização visual do guiamento pode ser conseguida por um dos seguintes processos:

- Utilização de um dispositivo de acoplamento diferente do “flip-mirror”, designado por “off-axis guider”, cujo princípio de funcionamento, ilustrado na figura 5.27, consiste num prisma que provoca o desvio para a ocular de uma pequena percentagem do fluxo luminoso incidente;
- Utilização de um telescópio de guiamento, montado solidária e paralelamente ao telescópio principal, como se fosse um buscador de grande ampliação.

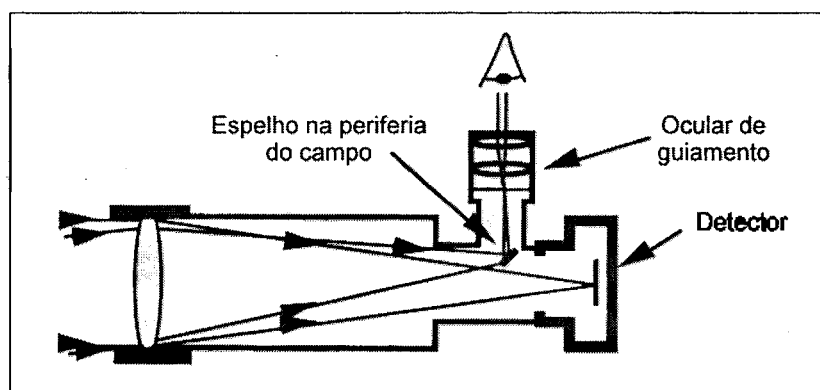


Figura 5.27 – “Off-axis Guider”, dispositivo que permite a monitorização visual da exposição, desviando parte do fluxo incidente para a ocular.

A complexidade de execução deste procedimento proporcionou o advento de sistemas electrónicos capazes de automaticamente o realizarem.

Algumas bases evoluídas de suporte da montagem integram um sistema electrónico conhecido por “PEC – Periodic Error Correction”, capaz de “gravar” as correcções realizadas durante um guiamento de teste, monitorizado por uma ocular, reproduzindo-as durante a integração da imagem.

O manual de construção da câmara “Cookbook CB245”, [Ref. 2], sugere a construção de um “Autoguider”, que consiste em substituir o comando eléctrico dos motores dos eixos do telescópio por um circuito electrónico de interface, comandado a partir da porta série do computador. O “software” de controlo da câmara CCD, em função “Autoguider”, e, a partir de múltiplas integrações rápidas, gera os comandos necessários para manter fixa a estrela seleccionada como guia. Contudo, este sistema apenas se revela útil como automatismo de monitorização do procedimento, sendo aplicável numa configuração de telescópio de guiamento, substituindo a ocular, mas obrigando à utilização de outra câmara como equipamento de detecção / aquisição de imagem.

Algumas câmaras CCD profissionais avançadas, possuem dois “chips” CCD: um, de maior matriz, destinado à integração da imagem; outro, de dimensões mais reduzidas, reservado para a função de guiamento automático.

Recentemente, o fabricante da câmara “Starlight MX916” lançou um sistema, que associado àquela câmara, é capaz de guiar a exposição e integrar a imagem, em simultâneo. Tal é possível devido à particularidade do “chip” que equipa a câmara, utilizar na transferência de carga o método “interline transfer, interlaced” (ver secção 4.3.2.), estrutura que permite dividir cada pixel em dois, com transferência / leitura independentes. Deste modo, metade pode ser lida em curtos intervalos de tempo, disponibilizando informação para o guiamento, enquanto a restante integra a imagem em longa exposição (informação mais detalhada disponível em [Ref.28]). Um programa de controlo específico gera e envia, através da porta série do computador, os sinais eléctricos de comando para os motores dos eixos do telescópio.

5.3.3. Sistemas Ópticos Acessórios:

Conforme discutido na secção 3.1.4., uma conveniente escolha da combinação óptica permite adaptar a resolução da imagem adquirida ao objecto – alvo em questão e às condições de “seeing” existentes no momento da observação:

- Em astrofotografia planetária os objectos – alvo caracterizam-se por apresentarem muito brilho, serem ricos em pormenores e geralmente poucos extensos; para a aquisição dessas imagens é conveniente reduzir a resolução espacial por pixel e a sensibilidade do detector, aumentando o número de pixels que formam a imagem e reduzindo o campo de visão; tal é conseguido por uma configuração óptica de maior distância focal, obtida por interposição de uma lente “Barlow” (figura 5.28a) no percurso óptico;
- Em astrofotografia de céu profundo os objectos – alvo caracterizam-se por serem muito ténues, pobres em pormenores e geralmente muito extensos; para a aquisição dessas imagens é conveniente utilizar maior resolução espacial por pixel e sensibilidade do detector, aumentando a área de cada pixel e o campo de visão; tal é conseguido recorrendo a “binning” ou por

uma configuração óptica de menor distância focal, obtida por interposição de um sistema óptico redutor de focal (figura 5.28b) no percurso óptico;

- Em condições de “seeing” desfavoráveis é preferível utilizar técnicas de “binning” ou configurações ópticas de menor distância focal, de modo a limitar a poucos pixels a dispersão da radiação, resultante da turbulência;
- Na aquisição de imagens da Lua, devido ao intenso brilho, é por vezes necessário atenuar a radiação incidente, visto o intervalo de tempo de integração mínimo, disponibilizado pelo “software” de controlo, ser suficiente para provocar a saturação do detector; tal pode ser obtido pela interposição de máscaras, do tipo das ilustradas na figura 5.25, com o intuito de diminuir a área útil do colector de radiação.

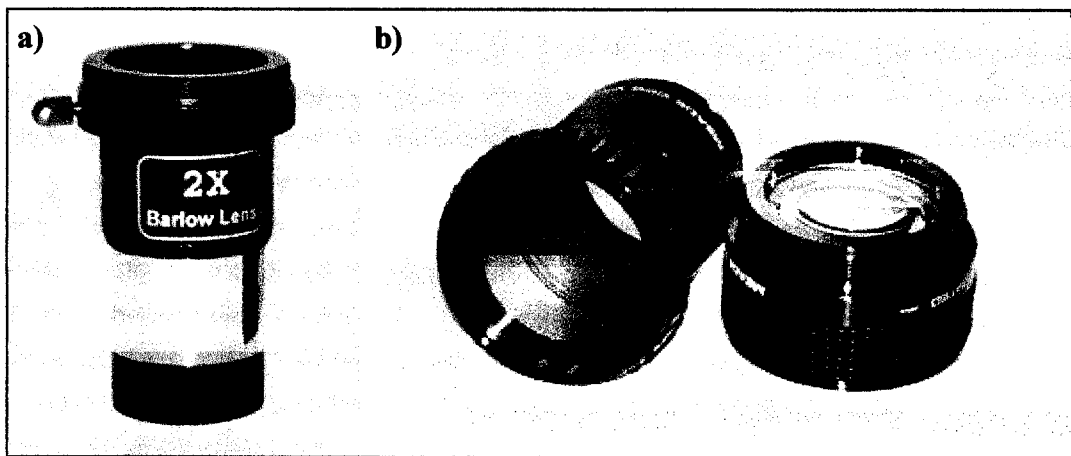


Figura 5.28 – a) Lente Barlow e b), Sistema Redutor de Focal, dispositivos intercaláveis no percurso óptico, que permitem modificar a configuração óptica do sistema, de modo a otimizar a resolução da imagem obtida.

De acordo com os dados disponibilizados na secção 4.4.2., alguns detectores apresentam máximos de eficiência quântica na região de infravermelhos do espectro. De modo a evitar a saturação do detector durante a aquisição de imagem de objectos ricos em infravermelhos (por exemplo, a Lua), pode-se intercalar no percurso óptico um filtro atenuador dessa gama de radiações. Alguns tubos de ocular permitem enroscar interiormente filtros deste tipo, desde que montados num caixilho circular com o diâmetro adequado.

É também possível realizar imagens a cores sobrepondo, por “software”, diferentes aquisições, realizadas com a interposição de filtros com transmissão selectiva de bandas do espectro. A figura 5.29 mostra uma caixa de filtros desse tipo, onde existe um filtro de bloqueamento dos infravermelhos (superior direito) e três filtros de transmissão selectiva – banda dos vermelhos (inferior esquerdo –

reflecte a cor ciano), dos azuis (inferior direito – reflecte uma tonalidade amarela) e dos verdes (superior esquerdo – reflecte magenta). As respectivas curvas de transmissão são apresentadas na figura 5.30 (cópia do manual de características que acompanha a caixa). Os filtros são montados num suporte próprio, que é introduzido numa ranhura, para o efeito existente na parte frontal do “Flip-mirror”, como se observa na figura 5.29.

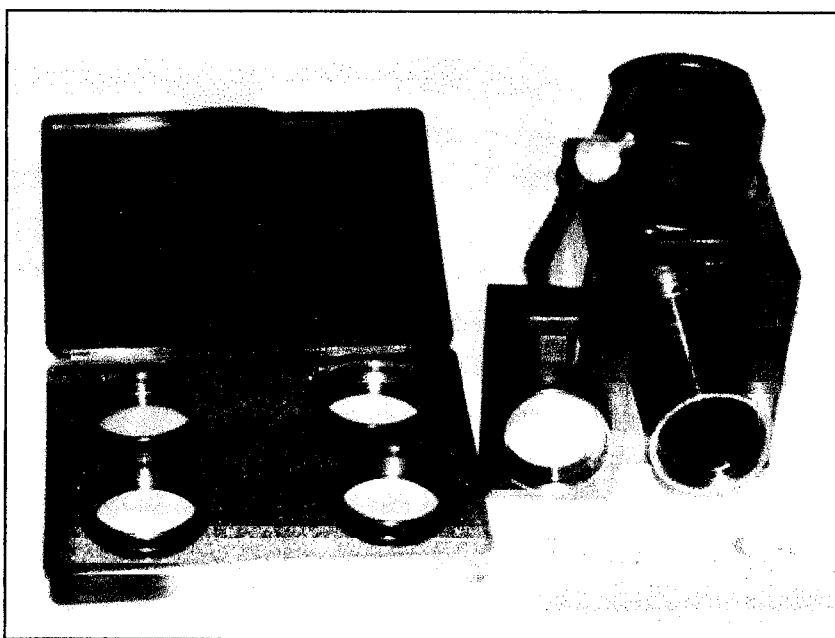


Figura 5.29 – Caixa de filtros para realização de imagens a cores por técnica tricromática e filtro de bloqueamento de infravermelhos. “TRUE TECHNOLOGY Lta”

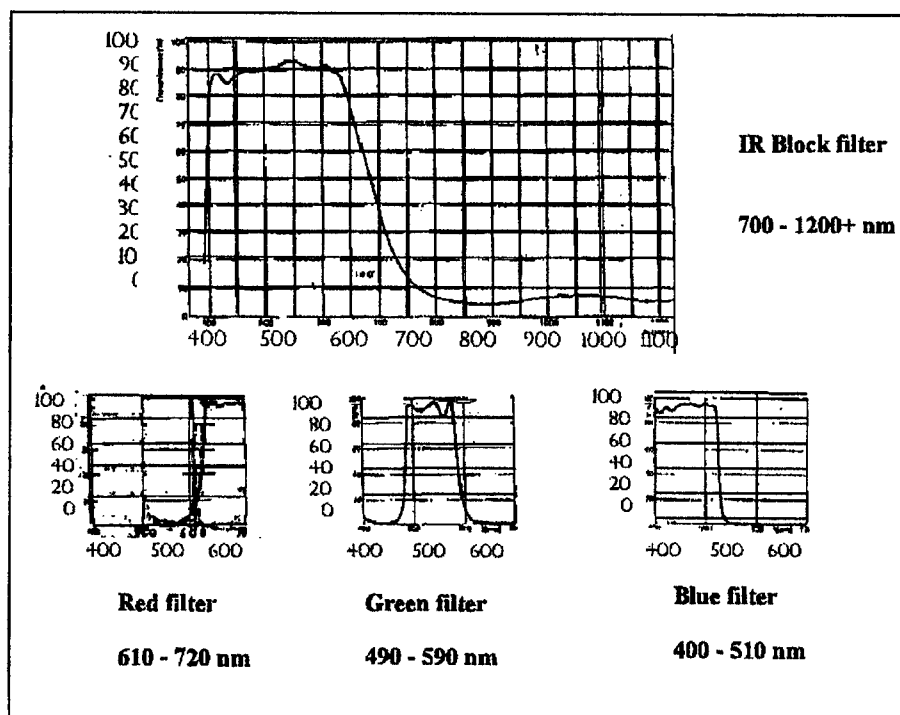


Figura 5.30 – Características de transmissão dos filtros exibidos na figura 5.29. “TRUE TECHNOLOGY Lta”.

5.4. CALIBRAGEM DAS IMAGENS

Após a integração de uma imagem, respectiva leitura do CCD e digitalização do sinal vídeo, fica preservada na memória do computador uma matriz de valores binários, com a dimensão da matriz de fotoelementos do detector CCD. Cada valor da matriz traduz a quantidade de carga eléctrica acumulada durante a integração no pixel respectivo. Contudo, conforme discutido anteriormente (secção 3.2.4.), nem toda a carga eléctrica acumulada num pixel tem origem na radiação incidente, pois parte da carga constitui ruído de diversas origens. Algumas componentes do ruído são determináveis, podendo ser reproduzíveis e subtraídas do sinal original, melhorando a relação sinal-ruído. Este procedimento constitui a calibragem ou pré-processamento da imagem, permitindo obter, a partir da matriz original ("raw image"), uma matriz de valores fotometricamente corrigidos, designada por imagem calibrada.

Seja, então, $S(x,y)$ o valor binário correspondente ao total de carga detectada no pixel de coordenadas (linha x , coluna y). Só parte desse valor total corresponde à carga eléctrica gerada por efeito fotoeléctrico no pixel, $s(x,y)$ e que constitui a informação que se pretende detectar. O restante do valor total corresponde a ruído originado por fontes distintas:

- Ruído térmico, devido à geração de cargas por efeito térmico nos fotoelementos, ou "dark current", que depende do tempo de integração t e da temperatura T do detector – $d(x,y,t,T)$;
- Ruído de leitura, originado por ineficiência da transferência de carga no "chip", ruídos próprios do andar de saída e do processo de digitalização, cujos efeitos conjugados geram um determinado valor residual, designado por "bias" e independente do tempo de integração t e da temperatura T do detector – $b(x,y)$.

Por outro lado, existem diferenças de eficiência quântica de fotoelemento para fotoelemento, isto é, a relação entre fótons incidentes e carga eléctrica gerada depende de cada fotoelemento, pelo que se pode atribuir a cada pixel um factor de resposta $r(x,y)$.

Nos termos definidos, pode escrever-se:

$$S(x, y) = b(x, y) + d(x, y, t, T) + s(x, y) \cdot r(x, y) \quad (5.12)$$

O pré-processamento da imagem ou calibragem corresponde a extrair do valor original $S(x, y)$ o valor corrigido $s(x, y)$. Será, então:

$$s(x, y) = \frac{S(x, y) - [b(x, y) + d(x, y, t, T)]}{r(x, y)} \quad (5.13)$$

Os valores $b(x, y)$, $d(x, y, t, T)$ e $r(x, y)$ podem ser obtidos a partir de exposições de teste, realizadas nas seguintes condições:

- “Bias frame”, S_b – exposição realizada em escuridão total, com o menor tempo de integração possível, de modo ao efeito térmico ser desprezável, vindo:

$$S_b(x, y) = b(x, y) \quad (5.14)$$

- “Dark frame”, S_d – exposição também realizada em escuridão total e em idênticas condições de temperatura T e com o mesmo tempo de integração t , da exposição original S , sendo:

$$S_d(x, y) = b(x, y) + d(x, y, t, T) \quad (5.15)$$

- “Flat field”, S_f – exposição realizada com um tempo de integração t_f garantindo uma iluminação homogênea K , em toda a superfície do detector, pelo que:

$$S_f(x, y) = b(x, y) + d(x, y, t_f, T) + r(x, y) \cdot K \text{ (constante)} \quad (5.16)$$

Em virtude de t_f ser normalmente reduzido, o efeito térmico pode ser desprezado, vindo:

$$S_f(x, y) \approx b(x, y) + r(x, y) \cdot K \text{ (constante)} \quad (5.17)$$

Aplicando as expressões (5.14), (5.15) e (5.17) na expressão (5.13), será:

$$s(x, y) = \frac{[S(x, y) - S_d(x, y)]}{[S_f(x, y) - S_b(x, y)]} \cdot K \text{ (constante)} \quad (5.18)$$

A expressão (5.18) sugere o procedimento a realizar para calibrar a imagem original e que consistirá em subtrair pixel a pixel da exposição original a “dark frame”, dividindo o resultado pixel a pixel pela exposição “flat-field” subtraída da “bias frame”. Obtém-se a imagem calibrada, à parte de uma constante.

Pelo descrito, revela-se importante numa sessão de aquisição de imagem, adquirir não só as imagens dos objectos astronómicos pretendidos, mas também realizar as exposições necessárias à geração das matrizes de correcção fotométrica – “bias frame”, “dark frame” e “flat field”.

5.4.1. “Dark Frames”:

Conforme anteriormente referido, o fenómeno de geração de cargas eléctricas, por efeito térmico em cada fotoelemento, é reproduzível, isto é, o seu valor médio pode ser inferido através de uma exposição de igual duração, realizada à mesma temperatura, na ausência de luz, “dark frame”. Assim, por subtracção, é possível recuperar o sinal devido apenas às cargas fotónicas, existente numa imagem.

De modo a garantir a eficácia da correcção proporcionada por uma “dark frame”, a sua aquisição deve ser realizada sistematicamente antes, ou após, a aquisição de cada imagem a calibrar, de modo a evitar eventuais variações de temperatura no detector, que ocorrem durante uma sessão de observação, devido ao calor gerado por efeito de Joule nos componentes electrónicos em funcionamento, à ineficácia do sistema de refrigeração ou à variação da temperatura ambiente.

No caso da temperatura do detector CCD ser medida e controlada, é possível construir um mapa de referência escalonável, “master dark frame”, a partir de um conjunto de exposições escuras realizadas apenas no início e/ou fim da sessão de observação. Tal método assume que a taxa de acumulação de carga térmica em cada fotoelemento é uma função linear da temperatura e do tempo de exposição. O mapa de referência, será uma matriz, $D(x,y)$, obtida pela média de várias exposições escuras $S_d(x,y)$, realizadas com tempo de integração t_d .

$$D(x, y) = \frac{\left(\sum_{i=1}^n [S_d(x, y) - b(x, y)] \right)}{n} \cdot t_d \quad (5.19)$$

Se t for o tempo de exposição da imagem a calibrar, o mapa de “dark frame”, $S_d(t)$, a subtrair da imagem original será:

$$S_d(x, y, t) = D(x, y) \cdot t + b(x, y) \quad (5.20)$$

O método será tanto mais preciso quanto maior for o tempo de exposição das imagens escuras, t_d , sendo aconselhado na literatura pelo menos 50% maior que o maior tempo de integração das imagens adquiridas.

5.4.2. “Flat Fields”:

Conforme referido, as exposições “flat field” pretendem realizar a compensação das diferenças de resposta fotoelétrica entre os fotoelementos, consistindo numa integração de iluminação homogénea sobre a superfície do detector. Por outro lado, poeiras ou imperfeições ópticas no percurso da radiação provocam atenuação do fluxo fotónico, traduzindo-se por pixels ou zonas da matriz de menor sensibilidade, sendo, portanto, corrigidas pela aplicação deste procedimento de calibragem.

Devido às condições expostas, os mapas de correcção “flat field” devem ser obtidos para cada posição do detector, cada configuração óptica da montagem e cada ponto de focagem.

O problema da aplicação deste procedimento reside em garantir uma iluminação homogénea sobre toda a superfície sensível do detector. Alguns autores aconselham a realização de várias exposições em diferentes direcções do céu crepuscular, tomando a sua média para eliminar eventuais estrelas detectadas. Contudo, não se revela prático, visto a configuração óptica, a posição relativa da câmara e a focagem, terem de ser mantidas constantes durante o resto da observação. Outros autores sugerem a exposição à radiação reflectida por uma

parede branca iluminada, nem sempre acessível num local de observação que se pretende sem poluição luminosa.

Em virtude do equipamento disponível para teste e as actividades de divulgação com carácter pedagógico que se pretendem realizar, os métodos acima referidos revelam-se não exequíveis, por haver necessidade de alterar várias vezes a configuração óptica da montagem e de retocar a focagem durante uma sessão de observação e aquisição de imagem.

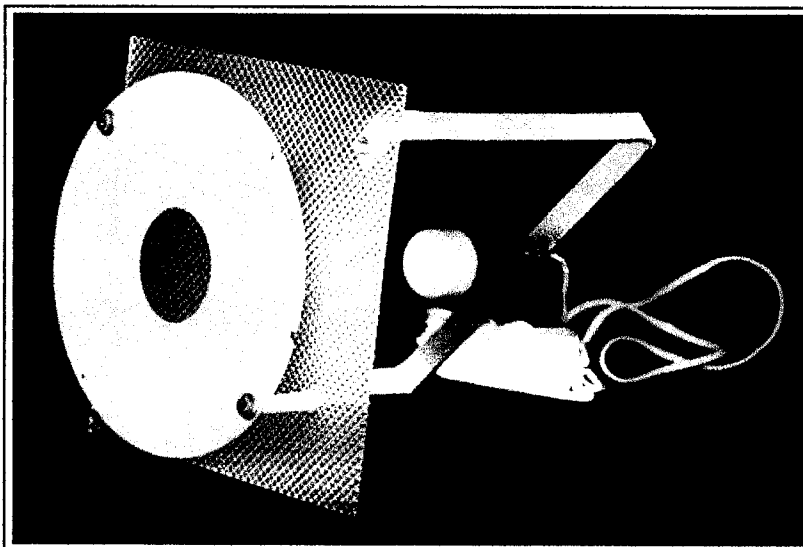


Figura 5.31 – Sistema de iluminação para exposições de aquisição de mapas “flat field”.

Com a finalidade de obviar a estes condicionalismos, foi desenvolvido um sistema prático que permite iluminar, de forma aproximadamente homogénea, a superfície do detector, estando disponível para realizar exposições de aquisição de “flat fields” sempre que necessário e se justifique. Consiste numa lâmpada eléctrica, alimentada por um regulador de intensidade de corrente para controle da intensidade de iluminação, à frente da qual se monta uma placa acrílica prismática, com a finalidade de dispersar a luz em múltiplas direcções; uma placa acrílica opalina, recortada com a forma da abertura frontal do telescópio, termina o sistema, difundindo e atenuando fortemente a radiação incidente, permitindo ainda a sua montagem sobre o telescópio. A figura 5.31 reproduz o sistema descrito e a figura 5.32 permite observar o sistema montado no telescópio.

De modo a permitir uma análise da eficácia do sistema, nomeadamente no que diz respeito à capacidade de gerar uma iluminação homogénea na superfície de detecção, exhibe-se o histograma de uma aquisição de “flat field”, obtida pela câmara

“MX916”, na figura 5.33. Como se pode verificar, a iluminação detectada concentra-se num intervalo de valores de largura razoavelmente estreita. É possível desenvolver o sistema, melhorando o difusor de luz ou testando diferentes tipos de lâmpadas a várias distâncias, de forma a reduzir o intervalo de valores do histograma.

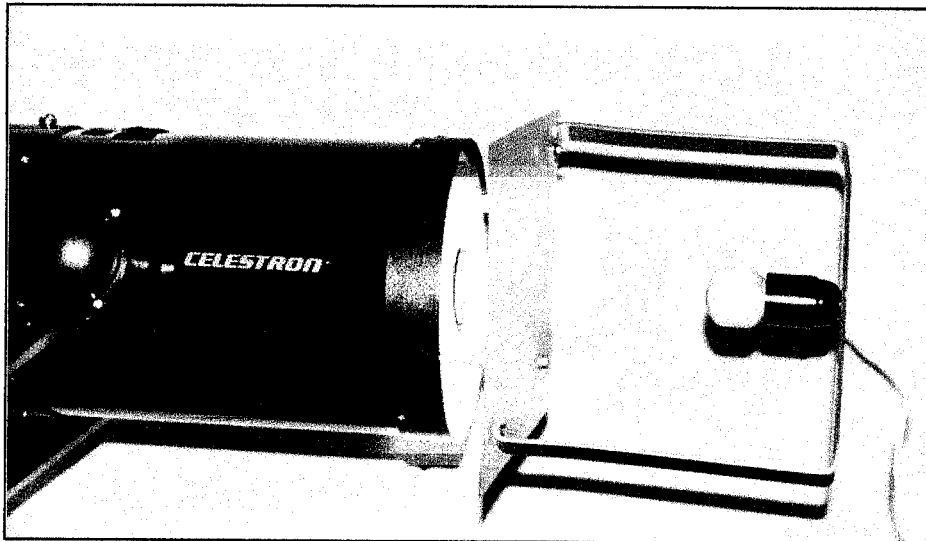


Figura 5.32 – Sistema de aquisição de mapas “flat field” montado sobre o telescópio.

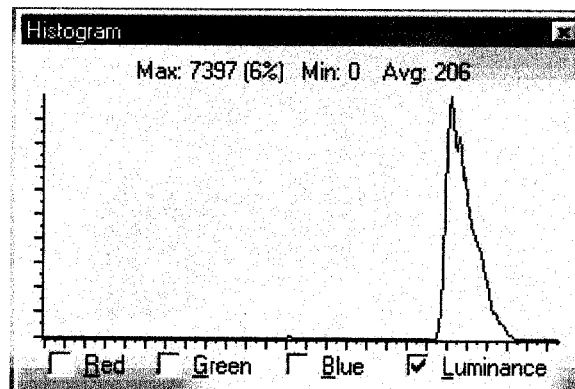


Figura 5.33 – Histograma de uma exposição “flat field”, obtida com o sistema de aquisição montado.

5.4.3. Exposições múltiplas:

Conforme referido na secção 5.3.2. o procedimento de guiamento da exposição revela-se de difícil e inexacta aplicação com os equipamentos disponíveis. Surge, portanto, a dificuldade de obter imagens de qualidade com exposições de longa duração.

Contudo existe um processo de simular exposições longas a partir da soma ou média de exposições mais curtas, disponibilizado por algum "software". Consiste em ajustar a posição dos campos de visão das várias exposições (individualmente calibradas) de modo a coincidirem pixel a pixel, a partir de um ponto de referência pré-determinado (uma estrela, por exemplo), seguido de uma operação de soma ou média das imagens resultantes.

A operação de simples soma permite aumentar o sinal existente, como se tratasse de uma exposição de duração igual à soma das durações individuais de cada imagem parcela. Contudo o ruído existente em cada parcela tem também carácter aditivo, pelo que a relação sinal-ruído não é melhorada, apenas a variação dinâmica do sinal (maior diferença de valor entre um pixel iluminado e outro escuro).

A operação de média não aumenta o sinal existente, mas tende a reduzir o ruído aleatório associado a cada imagem, obtendo-se uma imagem composta de melhor relação sinal-ruído. Este processo torna-se de aplicação indispensável em objectos-alvo que apresentem no campo de visão estrelas com nebulosidade associada: a ténue nebulosidade só é detectável com exposições de duração tal que provocam a saturação dos pixels iluminados por estrelas. Realizando múltiplas exposições rápidas e aplicando a operação de média referida, é possível obter as imagens das estrelas não saturadas, cumulativamente com a imagem da nebulosidade associada, por o seu fraco nível de intensidade de sinal se tornar superior ao nível de ruído.

5.5. SESSÃO DE OBSERVAÇÃO E AQUISIÇÃO DE IMAGEM

De acordo com o referido nas anteriores secções, uma sessão de observação e aquisição de imagem envolve uma série de procedimentos necessários à integração e afinação do sistema: montar o telescópio e realizar o respectivo alinhamento polar, estabelecer o acoplamento óptico e mecânico da câmara, ligar o respectivo sistema de refrigeração se necessário, preparar o computador para a operação e controlo da câmara, realizar a focagem, testar e afinar o sistema.

Como todo este processo se revela trabalhoso e demorado (cerca de uma hora), só se justifica no caso de haver disponibilidade para realizar uma sessão de observação de várias horas, tirando o máximo partido da instalação. Para tal convém ter escolhido previamente o local de observação, longe de fontes de poluição luminosa, assegurando as infra-estruturas necessárias: terreno nivelado para a instalação do telescópio, horizonte desimpedido em todas as direcções e fonte de energia eléctrica¹. Como é óbvio, as condições atmosféricas deverão ser favoráveis, proporcionando uma atmosfera limpa e clara.

É imprescindível ter preparado previamente toda a sessão, seleccionando os objectos-alvo pretendidos entre aqueles que se encontram em posição favorável, isto é, suficientemente altos, para limitar os efeitos da turbulência nas camadas baixas da atmosfera, e afastados da Lua, ou melhor, a sua ausência. É usual recorrer, para a preparação prévia da sessão, a programas simuladores de planetário, como os referidos na lista de referências bibliográficas ([Ref.40] a [Ref.42]). Deste modo é possível conhecer de antemão quais os equipamentos e acessórios mais adequados aos alvos seleccionados, preparando-os para a sua utilização. Como a observação deve ser realizada sem qualquer iluminação artificial presente, é conveniente estudar uma disposição eficaz de todo o material necessário, de modo a permitir realizar, sem dificuldade, qualquer operação de alteração ou manutenção do sistema, sem luz. É também importante assegurar um mínimo de conforto aos observadores, tornando mais agradável uma actividade demorada.

¹ Para observação em campo é conveniente possuir um conversor de 12VDC para 220 VAC, permitindo utilizar a bateria de um automóvel como fonte de energia eléctrica.

O computador que controla o sistema deve ser previamente preparado, verificando a funcionalidade dos programas necessários e assegurando capacidade suficiente para armazenamento dos dados a recolher. É de boa prática criar directórios de trabalho e torná-los os endereços de defeito nas operações de leitura / escrita de dados dos programas.

Como os dados recolhidos só serão tratados posteriormente, é conveniente anotar todas as ocorrências da sessão para futura referência e rápida identificação dos dados. O registo de exposições sugerido na figura 5.34, facilita esta tarefa.

REGISTO DE EXPOSIÇÕES - ASTROFOTOGRAFIA DIGITAL

DATA: ___ / ___ / ___ CCD: _____ TELESCÓPIO: _____ ARQUIVO ZIP: _____

Condições atmosféricas: _____

Montagem: _____

Flip-mirror:
Barlow:
Redutor focal:

Ficheiro	Hora	Alvo	Tempo expos.	Notas
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				

Figura 5.34 – Exemplo de uma folha de registo de exposições astrofotográficas.

Resta desfrutar da beleza do firmamento e explorar as potencialidades da astrofotografia digital. Após uma noite de observação seguem-se muitas horas de intenso trabalho de processamento dos dados obtidos.

ASTROFOTOGRAFIA DIGITAL COM DETECTORES CCD

- CAPÍTULO 6 -

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

6. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM

Após a realização de uma sessão de aquisição de imagem astronómica torna-se imperativo proceder ao tratamento dos dados recolhidos. Tratando-se de dados na forma digital, esse tratamento envolve a manipulação matemática das matrizes – imagens adquiridas, em meio computacional, recorrendo a “software” específico, descrito na secção 6.1, e podendo ser encarado como correspondente ao trabalho de câmara escura realizado em astrofotografia com película fotográfica (dados na forma analógica). É usual distinguir dois níveis distintos no processamento digital de imagem:

- O pré-processamento que, como se viu no capítulo anterior, consiste na calibragem (ou redução) da imagem, com o objectivo de controlar o carácter aleatório subjacente à observação e ao equipamento utilizado, ou seja, maximizar a relação sinal-ruído, correspondendo à fase de revelação em câmara escura;
- O pós-processamento que, pela aplicação de funções matemáticas à matriz-imagem, permite isolar a informação pertinente existente na observação, ou evidenciar os pormenores de interesse na imagem final, conferindo-lhe um aspecto mais realista ou artístico, correspondendo à fase de ampliação / impressão em astrofotografia clássica.

No sentido de melhor compreender a problemática associada ao processamento digital de imagem, torna-se necessário apreender o conceito de imagem digital e as diferentes formas que pode tomar. Basicamente, uma imagem consiste num mapa bidimensional da intensidade relativa de iluminação ou brilho (luminância). A forma de codificação dessa intensidade pode, contudo, variar conforme o equipamento que fisicamente suporta a imagem. Assim, e de acordo com o esquema apresentado na figura 6.1, podem-se reconhecer quatro formas distintas de suporte físico da imagem:

- Imagem electrónica no CCD, consistindo em variações da carga eléctrica acumulada nos fotoelementos do detector CCD, como amplamente discutido nos capítulos anteriores;
- Imagem digital pura em memória, resultante da amostragem e digitalização executada no conversor analógico-digital e transferida para o computador,

consistindo numa matriz digital em unidades de conversão analógica-digital (ADU), cujos valores dependem do conversor em causa;

- Imagem num écran de visualização, que resulta da conversão da matriz anterior, pela aplicação de uma tabela de transcodificação (LUT – “look up table”) específica do dispositivo de visualização, transformando os valores digitais em níveis de cinzento;
- Imagem em suporte informático permanente, que consiste na criação de um ficheiro informático, a partir da matriz em memória, de acordo com protocolos de codificação normalizados, de modo a serem interpretados por diferentes programas e sistemas, permitindo o intercâmbio da informação.

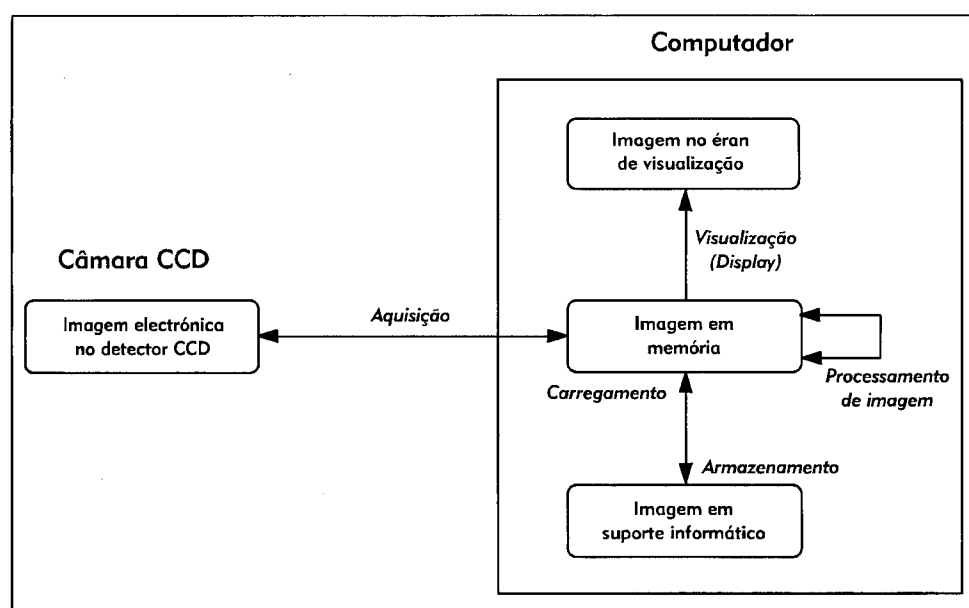


Figura 6.1 – Esquema ilustrativo das diferentes formas de uma imagem num sistema de aquisição, conforme o respectivo suporte físico.

Note-se que a imagem só adquire carácter permanente em suporte informático, visto os outros três tipos de suporte serem temporários e voláteis.

No presente Capítulo será apenas realizada uma análise sumária e superficial da problemática associada ao processamento de imagem, nomeadamente no que diz respeito ao suporte informático (Secção 6.1) e funções de visualização (Secção 6.2), aflorando-se aspectos relativos ao pós-processamento na Secção 6.3.

6.1. "SOFTWARE" DE TRATAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Os procedimentos de pré-processamento de imagem, referidos na Secção 5.4, envolvem operações aritméticas sobre matrizes, cálculos que podem ser facilmente executados por "software" específico.

Nas câmaras comerciais, incluindo a "Cookbook CB245", ao programa de controlo da câmara são adicionadas subrotinas de cálculo matricial destinadas à execução das necessárias operações de pré-processamento, como é o caso dos programas referenciados por [Ref.43] e [Ref.44]. Relativamente à câmara Quickcam, o programa de controlo não inclui tais funcionalidades, por ter sido desenvolvido tendo em vista outro tipo de aplicações; contudo, é possível encontrar e descarregar da rede Internet, vários programas utilitários de carácter "freeware", desenvolvidos com a finalidade de utilizar esta câmara como detector CCD em astrofotografia, como é o caso dos referenciados por [Ref.45], [Ref.52] e [Ref.53].

Rotinas de pré e pós-processamento de imagem digital astronómica podem ser encontradas nos programas referenciados por [Ref.46] a [Ref.50], sendo desenvolvidos especificamente para este tipo de aplicações. O programa "IDL V5.1", [Ref.51], constitui uma poderosa linguagem de programação especializada em processamento de imagem, permitindo ao utilizador escrever as rotinas necessárias à aplicação em vista.

Os pacotes de "Software" referidos por [Ref.56] a [Ref.59] constituem programas genéricos de manipulação de ficheiros de imagem, possibilitando algumas operações de processamento, revelando-se úteis na conversão de formatos de imagem e na distribuição e impressão dos ficheiros de imagem final, após processamento.

Os programas de controlo das câmaras geram normalmente ficheiros de imagem em suporte informático com formato próprio e específico de cada fabricante, tornando-se difícil a exportação desses ficheiros para outros programas de processamento de imagem, caso estes não suportem os formatos específicos de cada fabricante. No sentido de permitir o fácil intercâmbio de ficheiros entre os diversos programas de processamento e a compatibilidade entre diferentes fabricantes, foi desenvolvido um formato normalizado de ficheiros de imagem – formato FITS, normalmente suportado por todos os programas de controlo de câmaras CCD.

O formato FITS – “Flexible Image Transport System” foi desenvolvido, como standard de formato de ficheiros de grande flexibilidade, por astrónomos profissionais a partir de 1981, sendo desenhado para o armazenamento de grandes quantidades de dados científicos constituídos por matrizes multidimensionais de valores, suportando diversas codificações de valores: inteiros positivos com 8 bits, inteiros de 16 e 32 bits com sinal e reais representados em formato de vírgula flutuante por 16 e 32 bits.

No caso da câmara Quickcam, que gera ficheiros em formato BMP, são disponibilizados utilitários de conversão para formato FITS na rede Internet, referidos por [Ref.54] e [Ref.55].

De um modo geral os programas de processamento de imagem, interpretam o formato de ficheiro armazenado em disco, criando uma réplica em memória da imagem, sobre a qual aplicam operações aritméticas matriciais (soma, subtração ou multiplicação por constante), funções matemáticas mais elaboradas (exponencial e logarítmica, por exemplo) ou transformações em zonas determinadas da matriz (filtragem espacial passa-baixo ou passa-alto).

Uma análise pormenorizada das operações matemáticas, subjacentes ao processamento de imagem, ultrapassa o âmbito deste trabalho, podendo constituir um vector para futura investigação e desenvolvimento.

6.2. CONTROLO DE BRILHO E CONTRASTE – HISTOGRAMAS

A imagem no écran de visualização resulta da conversão dos valores ADU, presentes na matriz-imagem em memória, por meio de uma tabela de transcodificação (LUT – “look up table”) própria do dispositivo de visualização, transformando os valores digitais em cores ou níveis de cinzento. As imagens resultantes visualizáveis podem ser ajustadas em brilho e contraste, adaptando a resposta do écran ao tipo de informação presente e à visão humana, por meio dos comandos manuais existentes para o efeito no dispositivo. Contudo tal não se revela prático, pois altera o ajuste por defeito habitual, o que se revela incómodo para o operador. Contudo, existem processos de regulação de brilho e contraste por “software”, de maior comodidade e precisão de aplicação:

- Alterando a tabela de conversão (LUT), definindo os limiares mínimo e máximo (“threshold”) dos valores ADU, correspondentes respectivamente aos níveis preto e branco da resposta do dispositivo de visualização, sem alterar a informação da imagem em memória, conforme se esquematiza na figura 6.2;

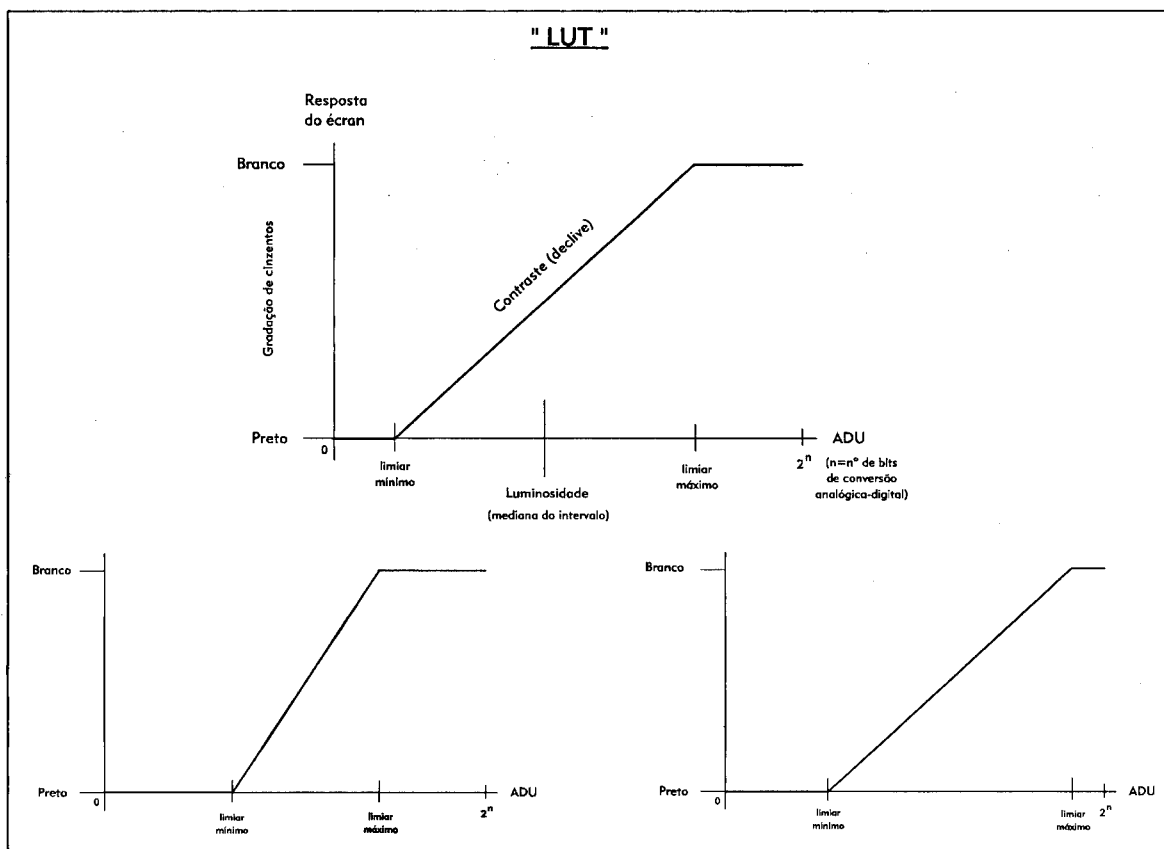


Figura 6.2 – Controlo de luminosidade e contraste por modificação dos limiares na tabela de conversão. No esquema inferior esquerdo, mantém-se a luminosidade, aumentando o contraste. No lado direito representa-se a situação de aumento da luminosidade com contraste constante.

- Alterando a informação presente na imagem em memória de modo a torná-la compatível com a resposta disponibilizada por defeito.

Neste segundo método realiza-se processamento de imagem, uma vez que se altera a matriz-imagem em memória, por aplicação de uma operação de subtração por uma constante seguida de multiplicação por outra constante. A alteração da matriz em unidades ADU, corresponde ao efeito de “esticar ou encolher” o respectivo histograma, como se pode verificar na figura 6.3, sendo esta operação de processamento conhecida na literatura anglo-saxónica por “STRETCHING”.

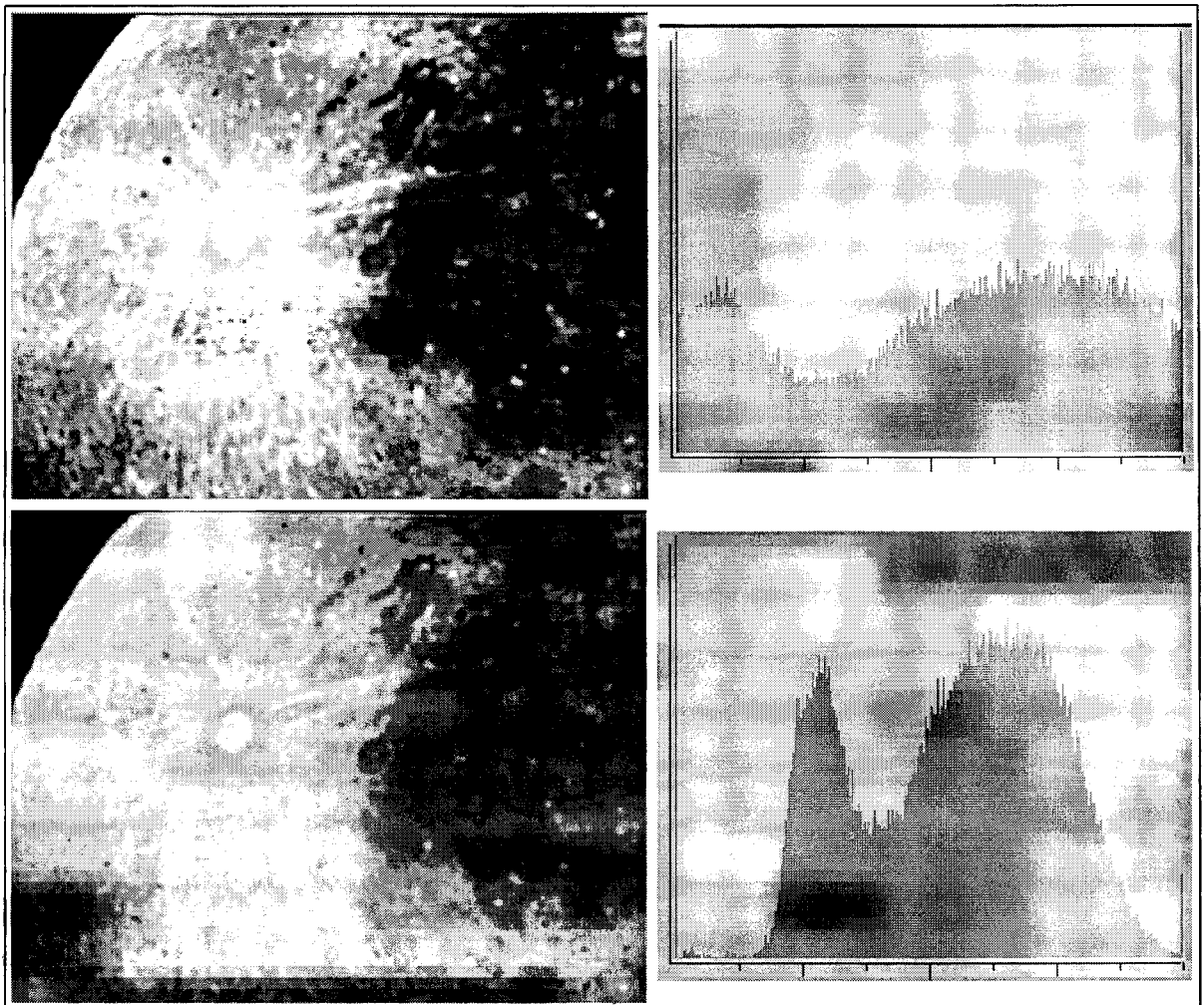


Figura 6.3 – Exemplificação da aplicação de uma operação de processamento “Stretching” a uma imagem. Na imagem superior definiu-se um intervalo entre limiares mais estreito, “esticando” o respectivo histograma, exibido à direita.

Para a interpretação e correcta aplicação da operação de “Stretching” é fundamental compreender o conceito de Histograma:

Consiste na representação do número de pixels da imagem (eixo vertical) em que ocorre o mesmo valor de unidades ADU (eixo horizontal);

Um histograma convenientemente “esticado” corresponde a um melhor aproveitamento das capacidades de resposta do écran em gamas de cinzentos, enquanto o oposto permite a identificação de maiores detalhes na imagem exibida;

A figura 6.4 pretende ilustrar o acima descrito, onde, sobre uma imagem de M42, obtida com a câmara CB245 construída, se aplicaram duas diferentes operações de “Stretching”.

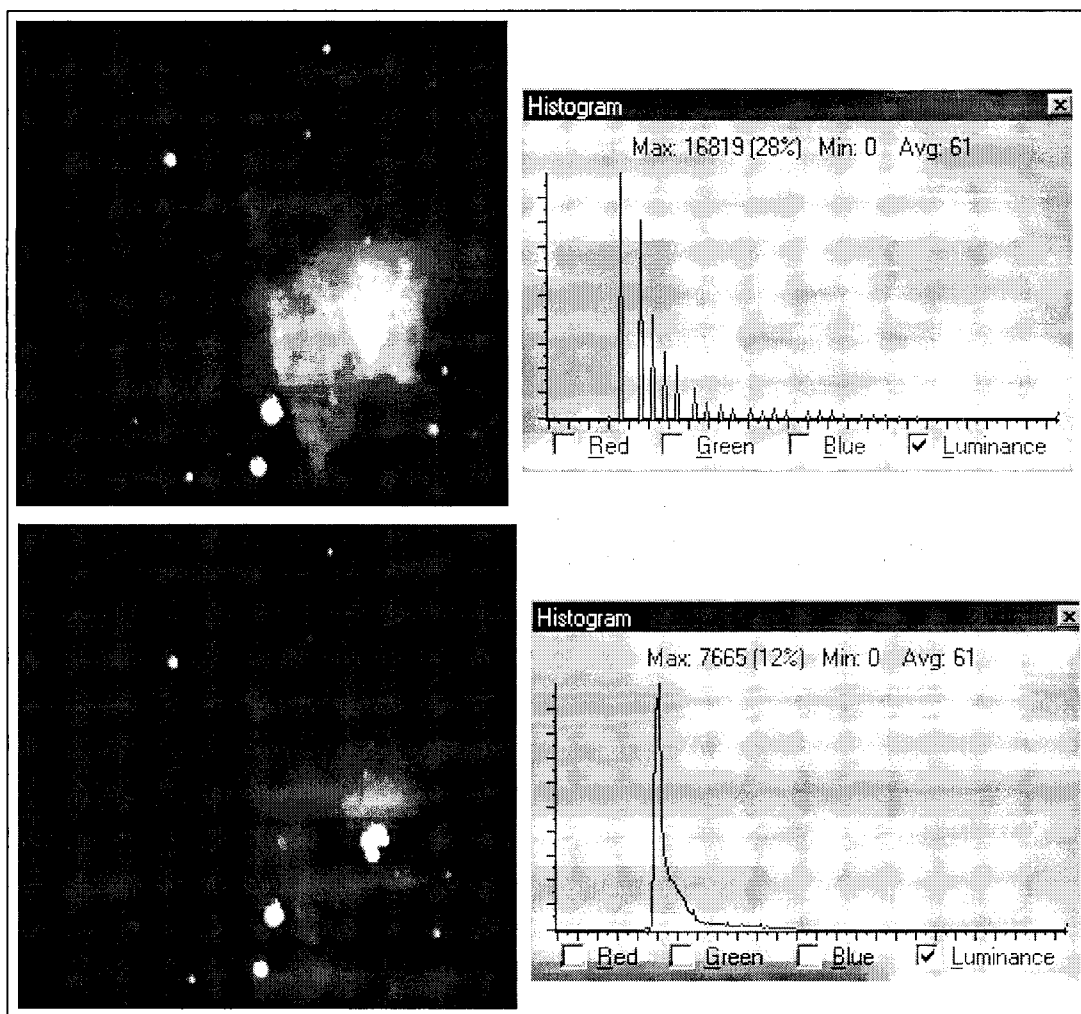


Figura 6.4 – Aplicação de “stretching” a uma imagem do objecto M42. Em cima um histograma mais alargado, corresponde a uma imagem mais rica em níveis de cinzento, permitindo perceber melhor a nebulosidade.

6.3. FILTRAGEM:

Uma outra técnica fundamental de processamento de imagem, designada por filtragem espacial, consiste na alteração do valor em unidades ADU de um pixel de acordo com os valores dos pixels vizinhos, ao contrário da técnica de “stretching”, que funciona independentemente em cada pixel. É usada para extrair detalhes de uma imagem e controlar o ruído.

A mais básica manipulação desta técnica corresponde à aplicação de um filtro passa-baixo, sendo por vezes designada por “smoothing” ou suavizamento,

realizando em cada região da imagem uma operação de média dos valores dos respectivos pixels, inibindo rápidas variações de pixel para pixel vizinho.

Outro tipo de filtros podem ser aplicados, dependendo do tipo de efeito pretendido sobre a imagem, como por exemplo, filtros passa-alto que funcionam de modo inverso do filtro passa-baixo, realçando os detalhes finos da imagem. A figura 6.5 compara a aplicação destes dois filtros a uma imagem de Saturno, adquirida com a câmara QuickCam.

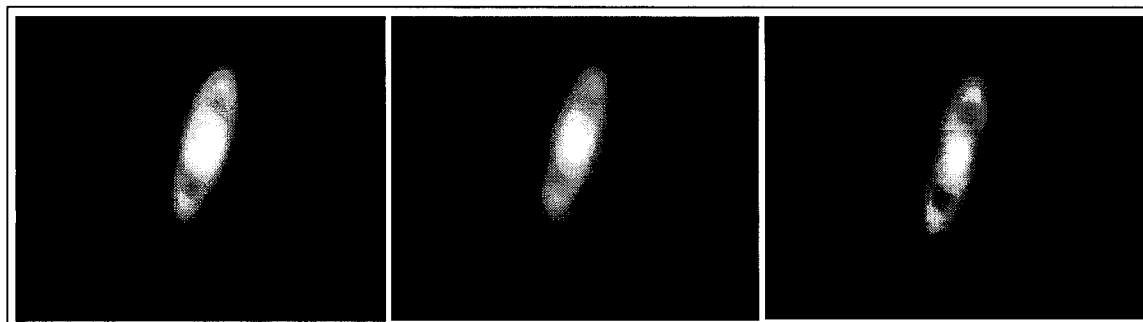


Figura 6.5 – Aplicação de um filtro passa-baixo (ao meio) e de um filtro passa-alto (à direita) à uma imagem de Saturno obtida com a câmara QuickCam (à esquerda).

A abordagem, necessariamente superficial, realizada aos diferentes métodos de processamento de imagem pretende apenas colocar o problema e aflorar o vasto campo de potencialidades disponíveis. O domínio da técnica subentende um estudo aprofundado das funções aplicadas e correspondente algoritmia. Contudo, só a experiência acumulada permite desenvolver a intuição de qual a função a aplicar, para “corrigir” ou provocar determinado efeito pretendido, sobre cada imagem em particular.

- CAPÍTULO 7 -

CONCLUSÃO

7. CONCLUSÃO

A realização do presente trabalho envolveu:

- a pesquisa e estudo de assuntos pertinentes para o tema em análise;
- a construção e teste de câmaras CCD;
- a experimentação e desenvolvimento de técnicas de observação com câmaras CCD;
- a realização de astrofotografia digital e posterior processamento de imagem.

Grande parte das vertentes práticas, de experimentação e de observação foram executadas nas instalações de uma Escola Secundária, com o apoio e assistência de alguns alunos interessados, permitindo testar a viabilidade do desenvolvimento de projectos tecnológicos promotores de interdisciplinaridade em contexto escolar, tendo sido desenvolvidas no âmbito das actividades de um Clube de Astronomia. Pelo facto de terem apelado ao desenvolvimento de inúmeras aptidões manuais, competências técnicas e científicas, revelaram-se de interesse para os alunos, uma vez que lhes despertou o interesse pelas Ciências e Tecnologias e lhes incutiu um espírito experimentalista e de investigação.

Por outro lado, a construção e desenvolvimento dos sistemas de observação foi realizada dispondo de escassos recursos materiais, procurando assegurar a acessibilidade destas técnicas e instrumentos a entidades dotadas de reduzidos orçamentos. Deste modo, as actividades sugeridas por este trabalho consideram-se de aplicação acessível e viável por entidades vocacionadas para a prática pedagógica e de divulgação em Astronomia.

Pelo exposto, os objectivos estabelecidos para este trabalho podem ser considerados atingidos.

De um modo mais pormenorizado, importa referir e avaliar as várias vertentes que compuseram a realização deste projecto:

- Relativamente à fase de pesquisa e estudo não foram encontradas dificuldades de maior, pelo apoio obtido junto do orientador e restantes elementos do Centro de Astrofísica, assim como pela facilidade de rápido acesso e proliferação de conteúdos disponibilizadas na rede Internet;

- No que diz respeito à construção das câmaras CCD foram sentidas as dificuldades próprias à realização de variadas actividades manuais fora dos conhecimentos e aptidões do executante, sendo ultrapassadas com recurso ao diálogo com especialistas, à persistência e alguma improvisação;
- A realização dos necessários testes comparativos das câmaras em bancada de ensaio revelou-se de execução complicada, por carecer de equipamento especialmente desenvolvido para o efeito e obrigar à integração total dos sistemas e respectivo “software” de controlo e processamento, desenvolvendo a aquisição de experiência de manipulação do equipamento e provocando a abertura de novos desafios;
- O gosto pessoal por actividades de campo possibilitou a realização e desenvolvimento de técnicas de observação com câmaras CCD, com entusiasmo, embora seja um aspecto de progressão lenta, em virtude de requerer muitas horas de trabalho e ensaio de equipamento, estando condicionada pelas condições atmosféricas e de visibilidade;
- Finalmente, a fase de processamento digital de imagem constitui uma área na qual não foi possível desenvolver os conhecimentos suficientes ao domínio das técnicas desejado, por envolver vectores de estudo distintos dos objectivos centrais do projecto. Constitui, contudo, uma área de investigação pertinente para um futuro desenvolvimento do trabalho realizado.

Resumindo, as facilidades já estão à partida condenadas a serem esquecidas face às dificuldades que geram aprendizagem e progressão intelectual e pessoal.

Concluindo, o conhecimento gera conhecimento e a investigação e estudo promovem a abertura de novos horizontes de interesse. Só esta ideia pode justificar a necessidade de continuar a aprender que sinto ao concluir esta tarefa.

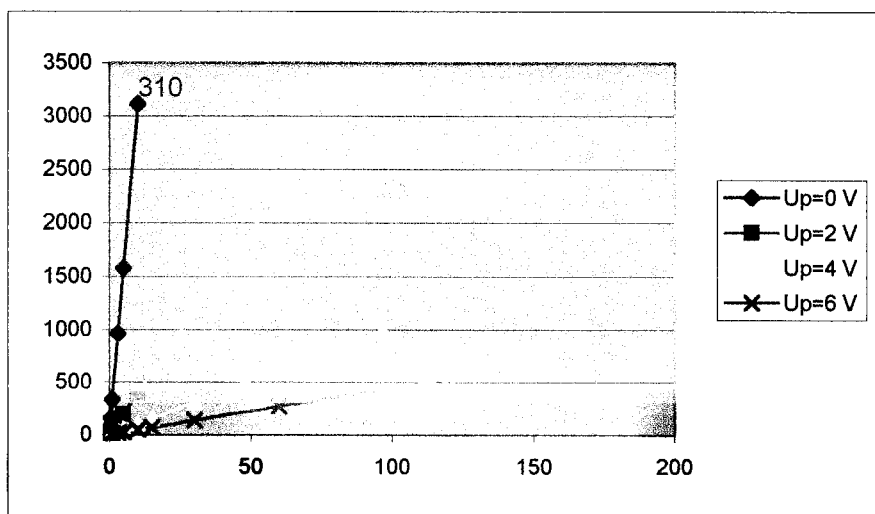
Porto, 14 de Junho de 2000

- APÊNDICE I -

A1.1 - RELATÓRIO DO TESTE AO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DA CÂMARA "COOKBOOK CB245"

T (s)	S (ADU)			
	Up=0 V	Up=2 V	Up=4 V	Up=6 V
0,5	159,3	23	6	4
1	336,7	43	11	8
3	963,3	123	34	18
5	1577,4	199	54	27
10	3118,9	399	107	51
15		593	155	73
30		1178	310	139
60		2308	622	273
120			1242	537
180				802

declives= 310,3954 38,4561 10,33528 4,433401 ADU/s



A1.2 - RELATÓRIO DOS TESTES DE DESEMPENHO DA CÂMARA "COOKBOOK CB245"

RUÍDO DE LEITURA:

Frame	S(ADU)	DP(ADU)
1	668,4	0,746
2	669,3	0,725
3	669,4	0,783
4	669,4	0,728
5	669,6	0,731
6	669,8	0,732
7	669,9	0,725
8	669,9	0,727
9	670,1	0,728
BIAS-MED	669,3	0,457

V. médios	669,5333	0,736111	ADU
		20,59046	e-

GANHO:

t (s)	S (ADU)	VAR
1	33,4	2,13
3	64,2	4,46
5	92,7	6,86
9	151,3	11,08
15	232,4	17,89
25	382,1	28,53
45	684,6	48,66
80	1196,8	86,96
60	892,3	66,08
30	441,9	33,79
20	287,3	23,9
12	116,3	14,75
6	82,1	8,02
4	54,5	5,58
2	26,2	3,29
1	13,1	2,34

G= 27,97194 e-ADU

σ_b = 24,52942 e-

LINEARIDADE:

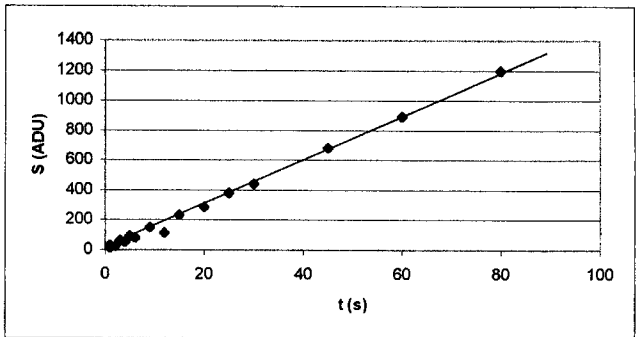
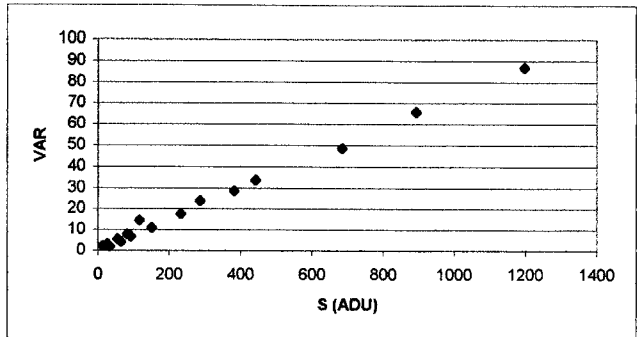
declive= 14,9201 ADU/s
417,3441 e-/s

"DARK CURRENT":

Exposições "dark" com t=480s, seguidas de exposições "bias"

D-K	Sd da frame D-B
1 (480s)	2144
2 (480s)	2137
3 (480s)	2129

Média 2136,667 ADU 4,451389 ADU/s
124,514 e-pixel/s



A1.3 - RELATÓRIO DOS TESTES DE DESEMPENHO DA CÂMARA "STARLIGHT MX916"

RUÍDO DE LEITURA:

Frame	S(ADU)	DP(ADU)	
1	3024	56	
2	3042	81,14	
3	3081	61,33	
4	3034	58,67	
5	3042	57,89	
6	3075	72,3	
7	3046	76	
8	3048	90,5	
9	3067	75	
BIAS-MED			
V. médios	3051	69,87	ADU
		171,6388	e-

GANHO:

t (s)	S (ADU)	VAR
1	192	952
3	466	1144
5	769	1394
9	1339	1891
15	2192	2637
25	3646	3849
45	6537	6118
80	11560	9988
60	8731	8134
30	4392	4472
20	2957	3299
12	1800	2254
6	928	1537
4	646	1314
2	357	1040
1	290	999

G = 2,456545 e-/ADU

$\sigma_b = 49,35701$ e-

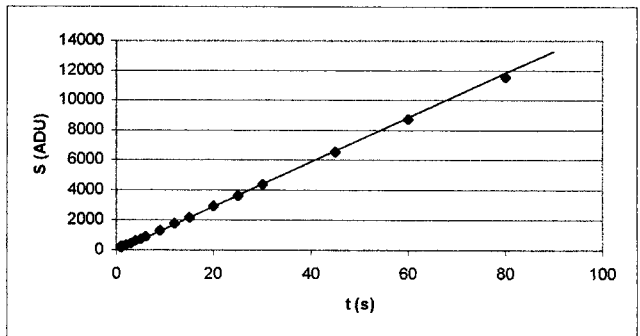
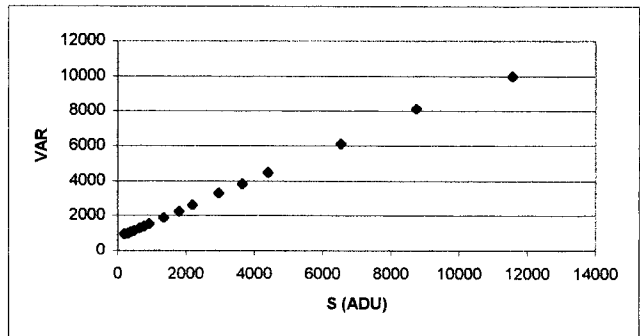
LINEARIDADE:

declive = 143,8868 ADU/s
353,4645 e-/s

"DARK CURRENT":

Exposições "dark" com t=480s, seguidas de exposições "bias"

D-K	Sd da frame D-B	
1 (480s)	185	
2 (480s)	178	
3 (480s)	183	
Média	181,3333 ADU	0,377778 ADU/s
		0,928028 e-/pixel/s



LISTA DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A) Obras de carácter geral:

- [1] C. Buil – “CCD Astronomy”, Willmann-Bell Inc., 1991.
- [2] R. Berry, V. Kanto, J. Munger – “The CCD Camera Cookbook”, Willmann-Bell Inc., 1994.
- [3] P. Martinez, A. Klotz – “A Practical Guide to CCD Astronomy”, Practical Astronomy Handbooks, Cambridge University Press, 1998.
- [4] D. Ratledge – “The Art and Science of CCD Astronomy”, Springer-Verlag, London 1997.
- [5] M. Mobberley – “Astronomical Equipment for Amateurs”, Practical Astronomy, Springer-Verlag, London 1999.
- [6] R. Berry – “Introduction to Astronomical Image Processing”, Willmann-Bell Inc., 1991.
- [7] D. Fanning – “IDL Programming Techniques”, Fanning Software Consulting, U.S.A. 1997.
- [8] M. Covington – “Astrophotography for the Amateur”, Cambridge University Press, 1991.
- [9] T. Dickinson, J. Newton – “Splendors of the Universe – A practical guide to photographing the night sky”, Firefly Books, Ontario 1997.
- [10] D. Levy – “Skywatching”, Weldon Owen, 1998. Edição portuguesa: “Observar o Céu”, Edições Atena, 1998.
- [11] Celestron – “Celestar Instruction Manual”, Celestron International 1997
- [12] Starlight Xpress – “MX916 CCD System User Handbook”, Starlight Xpress Ltd.

B) Artigos de publicações periódicas:

- [13] D. George – “Starting Out Right in CCD Imaging”, in CCD Astronomy – Summer 1995, <http://www.skypub.com/imaging/ccd/startout.html>, Sky Publishing Corp.
- [14] A. Holmes – “Optimizing a CCD Imaging System”, in CCD Astronomy – Winter 1995, <http://www.skypub.com/imaging/ccd/optimize.html>, Sky Publishing Corp.

- [15] M. Newberry – “The Signal-to-Noise Connection”, in CCD Astronomy – Summer 1994, <http://www.skypub.com/imaging/ccd/signalnoise.html>, Sky Publishing Corp.
- [16] D. George – “Image-Processing Basics: Stretching”, in CCD Astronomy – Fall 1994, <http://www.skypub.com/ccda/ccdalib/stretch.html>, Sky Publishing Corp.
- [17] D. George – “Image-Processing Basics: Spatial Filtering”, in CCD Astronomy – Spring 1995, <http://www.skypub.com/ccda/ccdalib/spatial.html>, Sky Publishing Corp.
- [18] A. MacRobert – “The Art of Using a Telescope”, in Sky & Telescope, 1998, <http://www.skypub.com/tips/telescopes/using.html>, Sky Publishing Corp.
- [19] A. MacRobert – “Using a Map at the Telescope”, in Sky & Telescope, 1998, <http://www.skypub.com/tips/skycharts/mapscope.html>, Sky Publishing Corp.
- [20] A. MacRobert – “Secrets of Deep-Sky Observing”, in Sky & Telescope, 1998, <http://www.skypub.com/tips/tricks/deepsky.html>, Sky Publishing Corp.
- [21] M. Coco – “Guiding a Telescope”, in Sky & Telescope, 1998, <http://www.skypub.com/imaging/guiding.html>, Sky Publishing Corp.
- [22] A. MacRobert – “Accurate Polar Alignment”, in Sky & Telescope, 1998, <http://www.skypub.com/imaging/polaralign.html>, Sky Publishing Corp.

C) “Internet Web Sites”:

- [23] Cookbook CCD Camera Home Page” - <http://www.willbell.com/cookbook/>.
- [24] Connectrix Corporation – <http://www.connectrix.com/>
- [25] Logitech – <http://www.logitech.com/cameras>
- [26] Texas Instruments Semiconductor – Technical Support / Products / Devices Datasheets & Application Notes – <http://www.ti.com/sc/docs/schome.htm>.
- [27] Sony Semiconductor – <http://www.sel.sony.com/semi/ccdarea.html>
- [28] Starlight Xpress – <http://starlight-xpress.co.uk>
- [29] Apogee Instruments, Inc. – “CCD University”, 1997, <http://www.apogee-ccd.com/ccdu.html>.
- [30] The Electronic Universe Project - “Evolving Towards The Perfect CCD”, <http://zebu.uoregon.edu/ccd.html>.
- [31] University Optics, Inc. – “Build Your Own High-Performance CCD Camera!” - <http://www.universityoptics.com/ccd.htm>

- [32] H. Müller – “Hanno Müller’s Developers Resources” – http://perso.club-internet.fr/uranos/disassemble_quickcam.htm
- [33] A. J. Cidadão – “QuickCam Astrophotography” – http://www.geocities.com/CapeCanaveral/5409/qc_index.html
- [34] Pedro Ré – “Pedro Re’s Astronomical CCD Imaging Page” - <http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/4171/>.
- [35] Michel Collart – “AstroCam” - <http://www.astrosurf.org/uranus/astrocam/>
- [36] Christian Buil – “Spectrography, CCD & Astronomy” - <http://astroccd.com/terre/buil/>
- [37] Al Kelly – “Al Kelly’s CCD Astrophotography Page” - <http://www.ghgcorp.com/akelly/>
- [38] Steven Lee - “The Art of CCD Imaging” - <http://www.aao.gov.au/local/www/sl/>
- [39] Al Kelly, Ed Grafton – “Acquiring and Processing Astronomical CCD Images” - <http://www.ghgcorp.com/akelly/procccd.html>

D) “Software”:

- [40] Sienna Software, Inc. – “Starry Night Deluxe V2.1.2”, 1990-98
- [41] Maris Multimedia, Ltd – “RedShift V3.0”, 1994-98
- [42] C. A. Marriott – “Skymap V3.1.11”, 1992-96
- [43] R. Berry, Willmann-Bell Inc. – “AP245”, “245PLUS”, 1994-95
- [44] Ian Bruce, Starlight Xpress – “Pix_M9 V2.5g”, 1999
- [45] Dave Allmon, <http://www.astrosurf.org/uranus/astrocam/> - “QC V2”
- [46] Christian Buil – “Quick-MiPS V1.8.1, R5”, “WinMips V1.7c”, 1994-96
- [47] Christian Buil, <http://astroccd.com/terre/buil/> - “IRIS V1.3.1”, 1999-2000
- [48] R. Berry, Willmann-Bell Inc. – “Astro-IP”, “AIP245”, 1996
- [49] R. Berry, Willmann-Bell Inc., <http://www.willbell.com/cookbook/check245.htm> – “Check245” 1996
- [50] Cyanogen Productions Inc. / Diffraction Ltd – “MaxIm DL V1.5”,
- [51] Research Systems Inc. – “IDL V5.1”, 1998
- [52] Dave Allmon, <http://www.astrosurf.org/uranus/astrocam/> - “DarkGen”
- [53] Jean-Paul Godard, <http://www.astrosurf.org/uranus/astrocam/> - “Astro QC V1.0.8”, 1998
- [54] Patrick Chevalley, <http://www.astrosurf.org/uranus/astrocam/> - “QCAM COPY”
- [55] Patrick Chevalley, <http://www.astrosurf.org/uranus/astrocam/> - “FIT2BMP”

- [56] Philippe Martinole, "AIM - Astronomical Image Manager, R1.03", 1996
- [57] Leonardo Loureiro, "Lview Pro 1.C5/32-bit", 1993-95
- [58] Jasc Software Inc. - "Paint Shop Pro V5", 1991-98
- [59] Adobe Systems Inc. - "Adobe Photoshop V4.0", 1989-96