



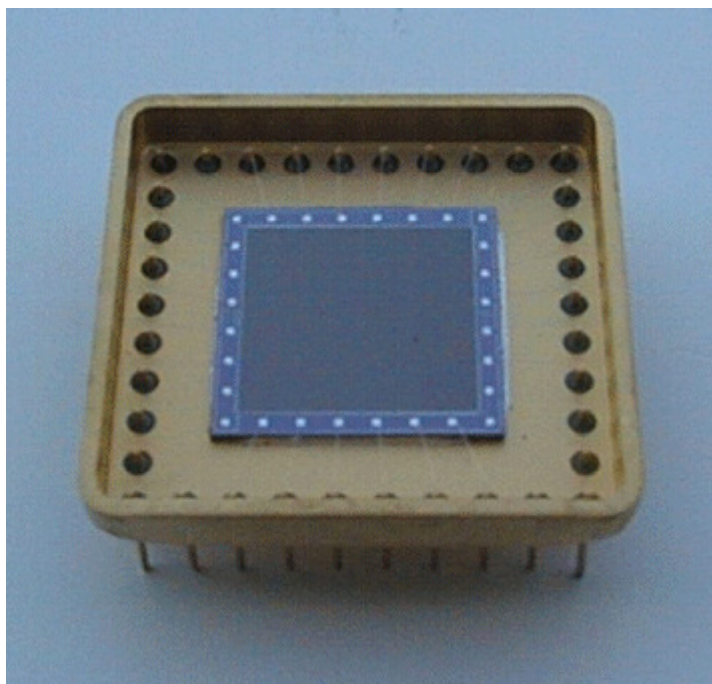
SENSITOMETRIA

2º Ano - Curso de Fotografia - 2º Ano

6º Capítulo - Detector Digital

- CCD

Um detector CCD (*Charge Coupled Device*) – Dispositivo de Carga Acoplada – consiste basicamente numa área plana foto-electricamente sensível. Este detector é colocado no plano focal de um sistema óptico (uma objectiva fotográfica, um microscópio, um telescópio), por exemplo em substituição do nosso *tradicional* filme foto-quimicamente sensível. O material básico que constitui a área plana fotossensível é o silício (este é *dopado*, por forma a atribuir-lhe propriedades fotoeléctricas). Como resultado, quando esta área fotossensível absorve (é atingida por) um fotão – ocorre o efeito fotoeléctrico – com a produção, libertação de um electrão.



Um circuito integrado CCD. A sua área fotossensível é a zona central.
Os finos fios ligam o *chip* de silício aos pinos do circuito.



Se examinarmos a área fotossensível de um CCD ao microscópio, verificamos a existência de uma malha regular de pequenas células (electricamente independentes). Estas células são chamadas de fotodetectores, abusivamente conhecidos por pixeis (*pixels*) - *picture elements*, com um tamanho desde alguns micrómetros (μm) até dezenas de micrómetros, dependendo do *chip*. O formato do pixel é tipicamente rectangular, (quadrado). Quando estes são polarizados electricamente (por aplicação de uma diferença de potencial eléctrico adequada), cada pixel tem a capacidade de armazenar *um grande número* de electrões, da ordem de 100.000 (10^5), *gerados* pelo fluxo de luz nele incidente. O número de electrões está directamente relacionado com o brilho (intensidade) do fluxo luminoso incidente nesse pixel e com a duração temporal (integração), ou seja com a exposição. Por exemplo, se a duração temporal é duplicada, o número de cargas eléctricas (electrões) acumulados também é duplicado.

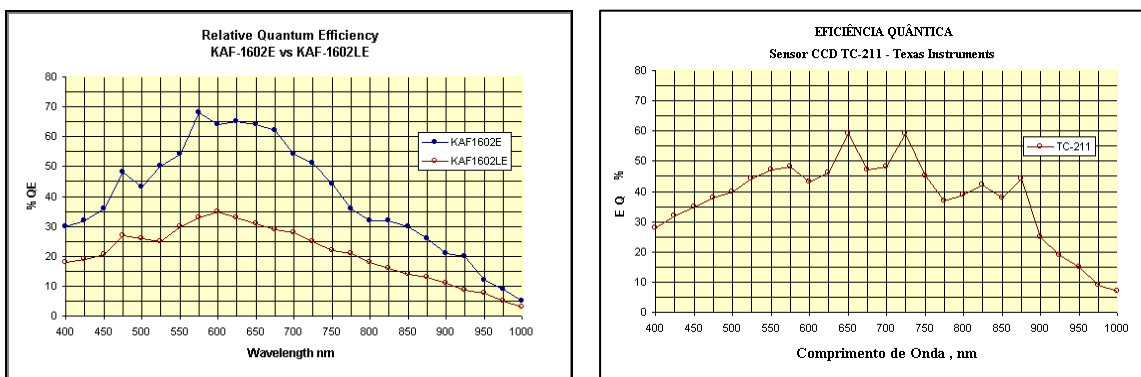


Fotografia da área sensível de um CCD, onde se podem ver os pixeis ordenados em linhas e colunas, de forma matricial.

A taxa de conversão do número de fótons em electrões é chamada de **eficiência quântica**. Esta eficiência quântica é largamente dependente do comprimento de onda da radiação incidente (luz), definindo a sensibilidade do CCD – o seu domínio espectral (normalmente de 0,3 a 1,0-1,2 μm). Nos comprimentos de onda onde o CCD tem a sua máxima sensibilidade, (usualmente no vermelho e infravermelho próximo, e mais recentemente no amarelo) a eficiência quântica é da ordem de 40 a 50%, existindo já CCD com pico de sensibilidade um pouco acima dos 90%. Se comparar-mos com



a nossa fotografia tradicional, onde apenas 3 a 4 fotões em cada 100 interagem efectivamente com os sais de prata, vemos que a diferença é muito significativa, estando os sensores do estado sólido uma ordem de grandeza acima em termos de sensibilidade.

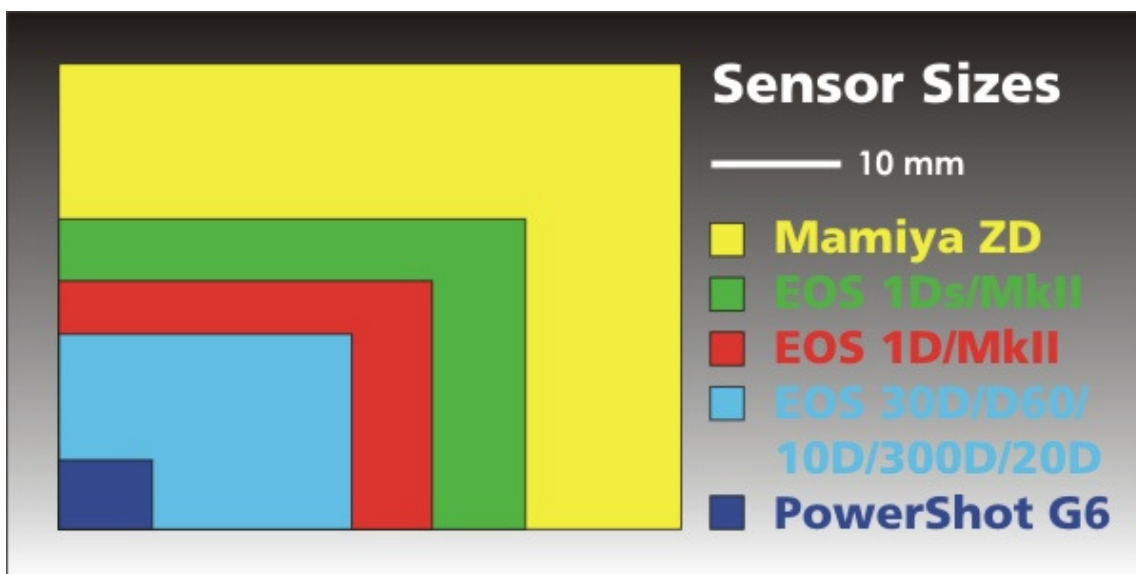


Eficiência quântica. Comparação entre dois tipos, do mesmo modelo da *Kodak* e da *Texas Instruments*.

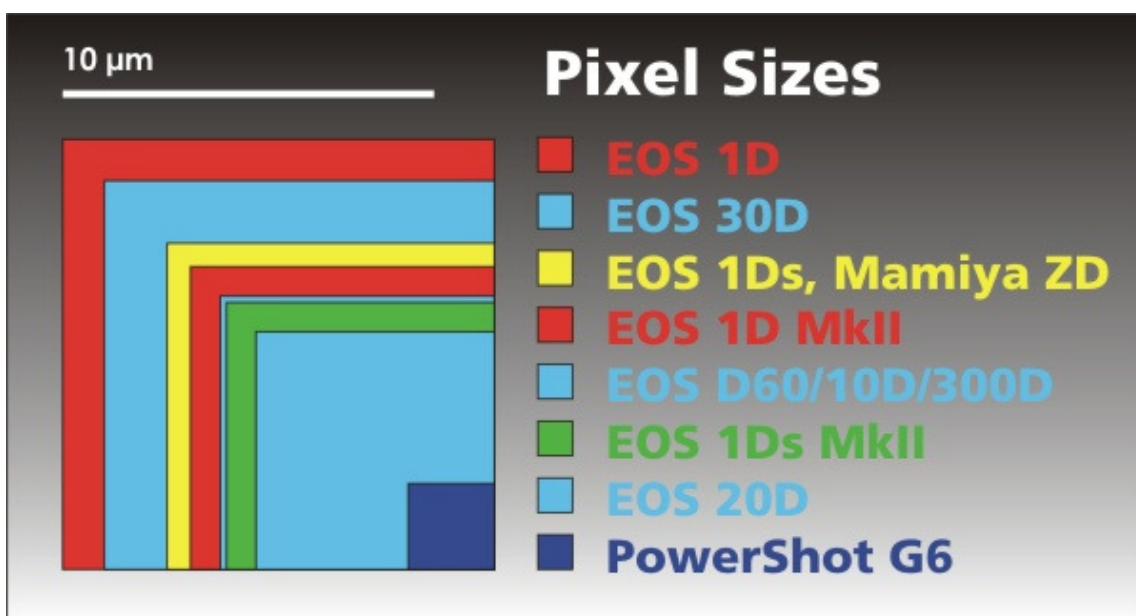
O *chip* CCD é fabricado nos formatos padronizados dos circuitos integrados, com a diferença e particularidade de terem no seu topo a área fotossensível, translúcida à luz. Uma pequena janela óptica protege esta área das poeiras e serve também de protecção mecânica aos finos fios de ligação.

Durante a exposição, a imagem óptica é convertida em cargas eléctricas, que serão depois a base da nossa imagem electrónica. Quanto mais pequenos forem os fotodetectores, melhor é a nossa amostragem (e a nossa resolução) dessa imagem electrónica. Assim a nossa imagem electrónica pode ter a capacidade de representar com precisão, ínfimos detalhes da imagem óptica. Como já referimos o fotodetector é abusivamente chamado de pixel, pois pixel (*picture element* - elemento de imagem) é o resultado da leitura do sinal eléctrico acumulado no fotodetector.

Na pratica, existe um limite físico para o tamanho dos fotodetectores (pixeis) que podemos usar - da ordem dos 6 μm , e também um limite das suas *performances*. Se o pixel é muito pequeno, a quantidade de carga que ele pode acumular é também pequena, o que diminui a escala dinâmica do registo (a escala de cinzentos). Se o pixel é muito grande (30 μm $\times$ 30 μm) podemos acumular um grande número de electrões, mas a nossa resolução de imagem é severamente diminuída.



Tamanho (comparativo) de sensores que equipam modelos de máquina digitais.



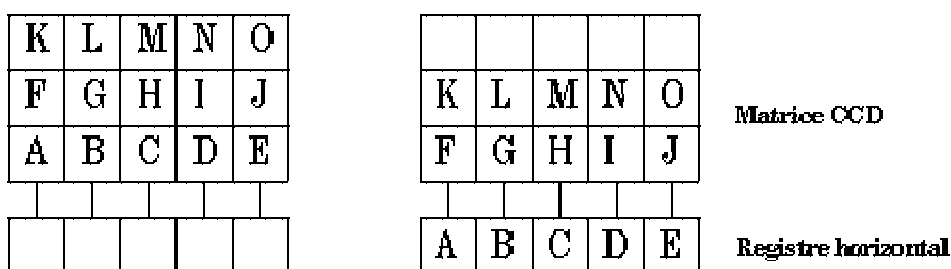
Tamanho (comparativo) dos pixéis em sensores de vários modelos de máquina digitais.

Os nossos actuais sensores CCD – bidimensionais - tem centenas ou milhares de pixeis em linhas e colunas, constituindo uma matriz de centenas de milhar ou usualmente milhões de elementos fotossensíveis.

Após a exposição, o sinal integrado (acumulação de electrões) em cada pixel, tem de ser transferido linha a linha, e na linha final (de leitura) coluna a coluna para o amplificador de saída. Por fim, um dos pinos do circuito integrado do CCD descarrega sequencialmente o sinal eléctrico analógico (quantidade de carga) de todos os fotodetectores.

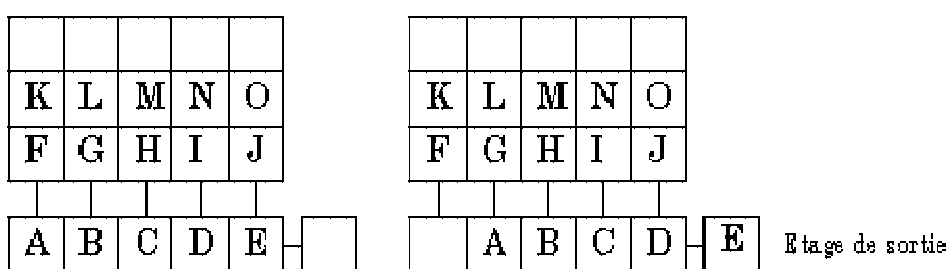


A transferência linha a linha dos pixels, chamada transferência vertical, é realizada por uma apropriada sequência de polarização das linhas de pixels. Essa polarização sequencial é feita usando impulsos de relógio (na direcção vertical). Com a frequência adequada de impulsos de relógio, as cargas eléctricas das linhas de fotodetectores são transferidas para a linha logo abaixo. Pelo mesmo processo, a última linha é transferida para a linha de leitura – *registo de transferência horizontal*. Nas figuras abaixo podemos verificar o mecanismo de transferência, de toda a sequência descrita.



Exemplo de transferência (CCD de 3 linhas por 5 columnas).

Quando a linha de leitura – *registo de transferência horizontal* – é preenchido com o sinal da última linha, esta tem de ser lida. Para isso, uma segunda sequência de impulsos de relógio (na direcção horizontal) é activada para que se efectue a transferência horizontal de cargas eléctricas. Quando a carga correspondente a um pixel atinge a última coluna (da linha de registo) é enviada e convertida num valor de tensão.



Após a leitura integral do registo de transferência horizontal, nova linha pode preencher de novo este registo.

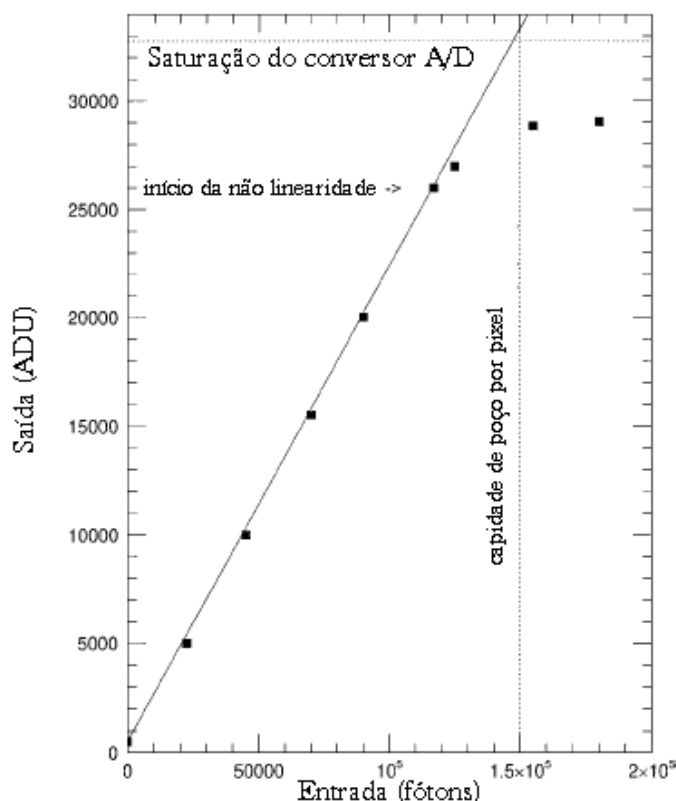
Após este processo de leitura e após a amplificação electrónica do sinal, este fica presente num dos pinos do *chip* CCD. A sua taxa de saída neste pino (chamado de *senal video*) é também condicionada pela frequência (“velocidade”) do relógio. O tempo total de leitura, depende da frequência do relógio e do número de pixels do CCD. Esse tempo pode ser da ordem de décimos de segundo a alguns segundos.



A fase seguinte é a conversão deste *signal vídeo* analógico - para um sinal digital. Para o fazer existe um conversor analógico-digital ADC (*analogic to digital convertor*), a 8-bits, 12-bits ou melhor ainda 16-bits, a que correspondem respectivamente 256, 4096 e 65536 níveis diferentes de cinzento. A representação, por exemplo num monitor de computador, da nossa imagem digital, é feita pixel por pixel (na forma matricial) em tons de cinzento, cores ou de outra forma. Para além desta representação, podemos guardar esta informação digital (numérica) num qualquer dispositivo adequado de gravação, hoje em dia - um suporte informatizado sob a forma de um ficheiro binário.

Uma das características mais importantes do circuito integrado CCD, é que a quantidade de ruído adicionado ao sinal vídeo é muito pequena. O ruído tem natureza aleatória e adicionado ao sinal real, pode ser em certas circunstâncias tão elevado, que o sinal acaba por ser “*apagado*”. O ruído limita a sensibilidade do sensor CCD, em simples palavras: ele limita a capacidade de detectarmos objectos pouco brilhantes. Regra geral, a unidade usada para descrever o nível de ruído é o número equivalente de electrões no sinal de saída do CCD. Um ruído inferior a 20 electrões (e^-) é característico de um sensor usado para detectar reduzidos fluxos luminosos. No entanto, não é o único parâmetro em que nos podemos basear para *determinar a qualidade* de um sensor CCD. A eficiência quântica é um parâmetro importante na quantificação da sensibilidade do sensor, e como já vimos é normalmente da ordem dos 30 - 40 % ou superior. Outra característica muito importante é a sua linearidade, isto é, a sua resposta proporcionalmente linear á quantidade de luz recebida, desde poucos fotões (electrões á saída) até ao limite da capacidade de armazenamento de cada pixel. Podemos eleger a resposta linear como a característica marcante deste tipo de dispositivos fotossensíveis.

A imagem transferida do sensor (*chip*) CCD para a memória (da máquina, computador, etc) é a chamada imagem em bruto (*raw image*) Ela contém informação da cena fotografada (através do sistema óptico) e também de diversos *sinais adicionais* (ruído electrónico ou interferência electrónica). Esses “sinais adicionais” devem ser tidos em consideração, pois a sua correcção nas nossas imagens digitais é essencial e fundamental – para a obtenção de uma imagem final de qualidade.



Resposta “linear” de um sensor CCD.

Número de fótons incidentes *versus* Unidade Analógico-Digital (ADU).

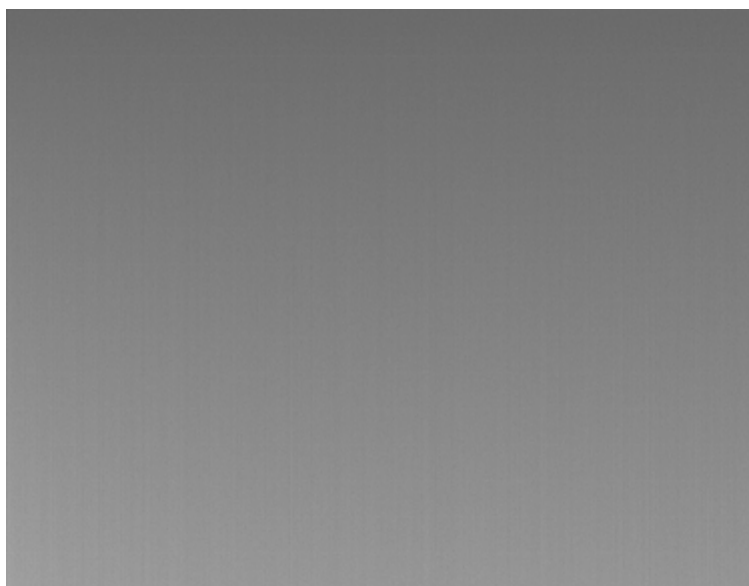
Ruído electrónico do *chip*

- Enviesamento (*offset* ou *bias*)

Todas as imagens que obtemos estão enviesadas, alteradas de um ruído de fundo – que é constante, independente da exposição e da temperatura do sensor. Este ruído deve-se aos elementos electrónicos integrantes do sensor e também dos circuitos electrónicos do processador do sinal vídeo. Este ruído representa uma percentagem (3-5%) do sinal total que podemos registar, e é muito semelhante de foto sensor para foto sensor (pixel para pixel).

Podemos obter “uma imagem” (mapa) deste ruído – efectuando uma integração mínima¹ (com tempo nulo ou o menor possível) com o sensor em escuridão total – o que equivale na prática a fazer simplesmente a leitura do registo acumulado no sensor. Este ruído de *offset* faz com que, equivalentemente ao registo dito analógico, tenhamos uma densidade não nula – mesmo sem exposição.

¹ Na prática não podemos simplesmente efectuar uma única exposição, temos de efectuar várias.



“Imagem” do ruído *offset* (mediana de 9 imagens).
Valor médio de 2839, em 65536 níveis (16 *bits*).
Valor mínimo de 2742, valor máximo de 2970.

- Corrente Negra (*dark current* ou *dark frame*)

Um outro ruído que se adiciona sempre ao nosso sinal (a nossa imagem formada pelo sistema óptico) deve-se ao ruído térmico. Este ruído, também conhecido como corrente negra, *dark current* ou *dark frame*, aparece “espontaneamente” em cada foto sensor (pixel) durante a nossa exposição. Este ruído (térmico) deve-se aos movimentos aleatórios dos electrões no interior do *chip*, o que gera uma carga adicional que é colectada nos pixeis.

A diferença entre estes dois ruídos, térmico e *offset* - é que o ruído térmico é tanto maior quanto mais elevada for a temperatura do chip², daí que em aplicações científicas os sensores sejam arrefecidos, funcionando a temperaturas abaixo do zero grau *Celsius*. Outra grande diferença é que o ruído térmico cresce linearmente no tempo, quanto maior a “exposição” maior o valor deste ruído. Podemos *facilmente* obter uma “imagem” (mapa) deste ruído térmico fazendo uma exposição com o sensor em total escuridão (sem imagem óptica). Deste modo só o ruído térmico (e o ruído de enviesamento) fica registado na nossa “imagem”. Esse ruído será representativo do tempo de integração efectuado e da temperatura do sensor.

² Tipicamente o ruído térmico duplica com a elevação de 8-10 °C no sensor.



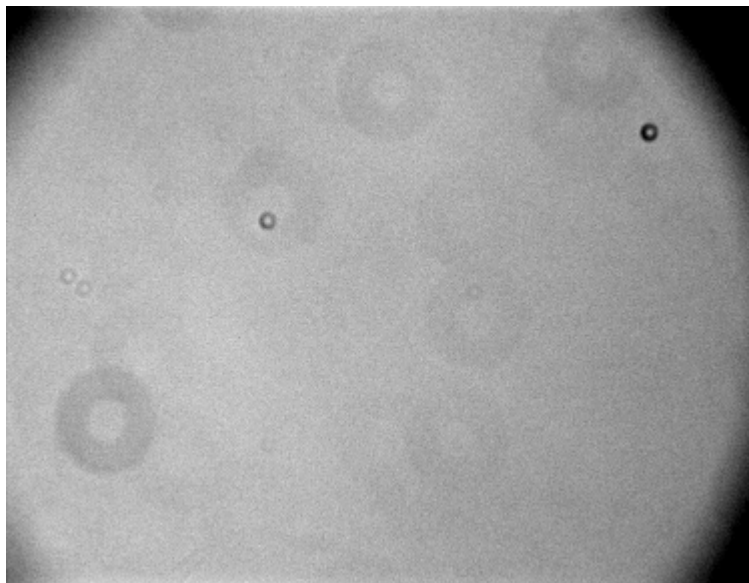
“Imagem” do ruído térmico (*dark current*) (mediana de 5 imagens de 150 s).
Valor médio de 177, em 65536 níveis. Valor mínimo de 8, valor máximo de 9372.
(imagem já corrigida do mapa de *offset*)

Como podemos verificar, a resposta individual dos pixeis é muito diversificada. Uns obtêm valores muito elevados outros muito baixos, o que confere á “imagem” o seu característico aspecto “granulado”. No conjunto destes pixeis, existem os chamados *hot pixeis* e os *cold pixeis*, pixeis com resposta anómala, muito acima ou muito abaixo da média, respectivamente. O mapa destes pixeis, tal como de pixeis defeituosos ("cegos") que existem no sensor, são a *impressão digital* deste – cada sensor têm o seu padrão único. O número de pixeis anómalos do sensor vai aumentando com o tempo (envelhecimento do sensor), pois estes estão, por exemplo, constantemente sujeito á interacção com radiação ionizante de alta energia e podem assim ficar danificados.

Estes ruídos inerentes ao sensor CCD e ao tempo de integração (exposição) são relativamente “fáceis” de corrigir nas nossas imagens. Esta fase de calibração, chamada de *pre-processamento*, só fica completa com a calibração do “mapa de uniformidade” do sensor. Na prática, cada pixel tem a sua sensibilidade. Esta difere ligeiramente de pixel para pixel. Para além deste efeito, o campo criado pelo sistema óptico exhibe o efeito de *vignetting* e o sensor sofre também obstruções por parte de poeiras e impurezas no trajecto dos raios luminosos.



A correcção do “mapa de uniformidade” do sensor (*flat-field*) é uma normalização que fazemos de modo a elevar a um nível médio os pixels menos sensíveis e a diminuir o valor dos pixels mais sensíveis a esse mesmo nível médio. Tal mapa é obtido a partir do registo de um campo uniforme de luz, por exemplo um painel branco uniformemente iluminado.



“Imagem” do mapa de uniformidade (*flat-field*) (mediana de 7 imagens).
(imagem já corrigida dos mapas de *offset* e *dark current*).
É notório o efeito de poeiras no percurso óptico do sistema.

Na fase de leitura, o registo do sinal eléctrico de cada pixel, no pino de vídeo do sensor, é convertido num valor numérico (como já referimos). Essa digitalização, conversão do sinal analógico em sinal digital é efectuada no conversor analógico-digital (ADC). Os níveis de digitalização possíveis dependem da capacidade do nosso ADC. Um conversor de 8 *bits* permite no máximo uma discriminação de 256 níveis de cinzento (2^8). Um de 16 *bits* já permitirá um máximo de discriminação de 65536 níveis de cinzento (2^{16}).

A capacidade máxima de acumulação de carga em cada pixel, é como já vimos função do seu tamanho físico. O conversor analógico-digital e a correspondência entre a carga registada e a respectiva unidade digital (ADU - *Analogic to Digital Unit*), é também escolhido de acordo com essa capacidade. Se o nosso pixel consegue acumular cerca de 82.000 electrões, então um conversor analógico-digital de 14 *bits* ($2^{14} = 16384$ unidades digitais), com um factor de conversão de 5 electrões para cada unidade digital (ADU) é suficiente para digitalizar a imagem. Na prática, tal



digitalização é feita com um ADC de 15 ou 16 *bits*, pois os nossos conversores exibem sempre um erro de digitalização, isto é não conseguem discriminar "pacotes" de 5 electrões (para o exemplo considerado) com essa precisão, podem ter, também por exemplo, um erro de leitura na fase de digitalização equivalente a 15 electrões.

A dinâmica real será então de $82.000 / 15 \approx 5467$ níveis discriminados.

Neste caso, um ADC de 13 *bits* ($2^{13} = 8192$ unidades digitais) seria suficiente para a digitalização da imagem. O facto de usarmos ADC de maior capacidade de discriminação serve para diminuirmos "o peso" do ruído perante o nosso sinal.

Se o nosso sensor CCD for de grande qualidade e exibir um ruído de leitura muito baixo (apenas alguns electrões), então podemos efectivamente ter uma grande dinâmica (um grande número de discriminação de níveis) e usar um ADC que corresponda às necessidades. Quanto mais elevado o nível de digitalização, maior o tempo de leitura de todos os pixeis do sensor CCD e mais informação correspondente a cada pixel temos de guardar.

O crescimento da qualidade e quantidade de área fotossensível disponível nos actuais CCD e CMOS (grande número de pixeis, da ordem de muitos milhões), tem de ser sempre acompanhada de um igual crescimento na velocidade de transferência dessa mesma informação, e na capacidade de armazenamento e manipulação dessa gigantesca quantidade de dados, que podem atingir nos agrupamentos de muitos CCD, cerca de 100 Mb por imagem.

Exemplo de sensor de imagens digitais monocromática

Chip CCD - Kodak (KAF0400)

Máquina Digital Audine – ADC 15 *bits* (32768), ΔT de -25 a -30 °C

Tamanho do sensor	512×768 pixeis (4,6×6,9 mm)
Tamanho do "pixel"	9 μm × 9 μm
Factor de Forma	100 %
Sensibilidade (a 550 nm)	44.500 e^-/lux
Eficiência Quântica (400 nm)	3 % (<i>blue</i>)
Eficiência Quântica (550 nm)	33 % (<i>green</i>)
Eficiência Quântica (700 nm)	40 % (<i>red</i>)
Eficiência Quântica (1000 nm)	8 % (<i>IR</i>)
Ruído de leitura	13 e^-

1 lux é igual a uma densidade de fluxo luminoso de $1,47 \times 10^{-7} \text{ W/cm}^2$



Procedimento para obter imagens de calibração (pré-processamento básico da imagem)

Obter várias imagens de Enviesamento (cerca de meia dúzia),
– integração de zero segundo (ou com a maior “velocidade” permitida) com a máquina / objectiva protegida da luz.

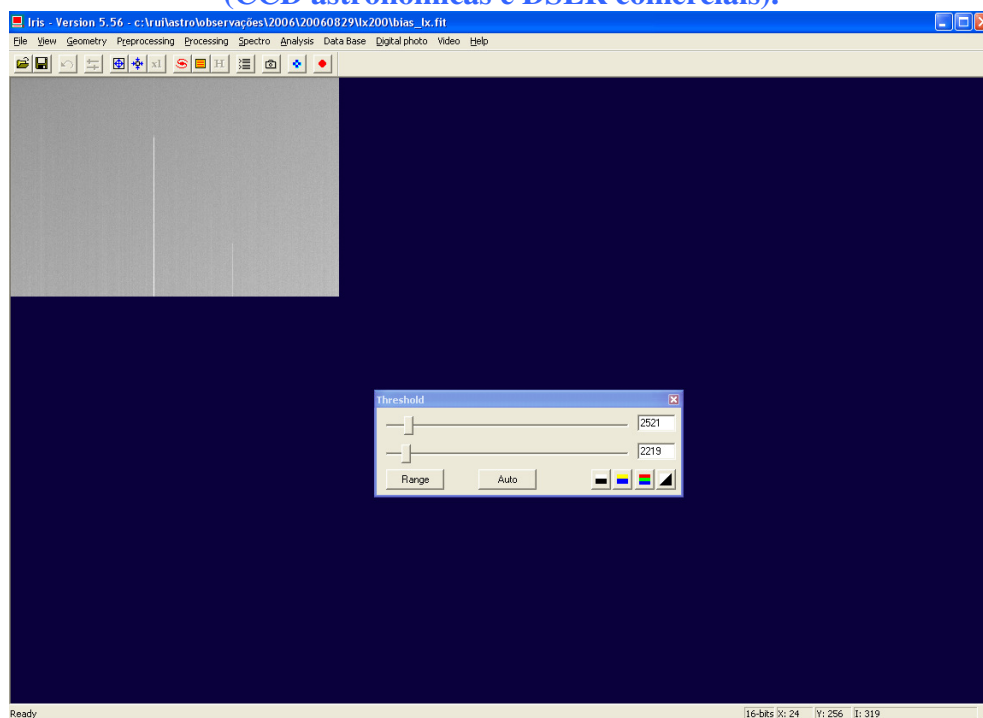
Obter várias imagens de Corrente Negra (cerca de meia dúzia),
– integração com um tempo da mesma ordem (ou superior) aos tempo de integração com que iremos trabalhar (à mesma temperatura).
(imagens obtidas com integração constante, por ex: 10 s)

Obter várias imagens uniformemente iluminadas (cerca de meia dúzia),
– integração com o tempo necessário, de modo a permitir um preenchimento superior a 75% da dinâmica do sistema. Podemos usar o histograma para verificar esses valores.

Devem ser registados todos estes parâmetros e condições da obtenção das imagens, tal como os respectivos nomes dos ficheiros (imagens) obtidos.
(basicamente informação incluída nos metadados)

IRIS

**Software (livre) de aquisição e processamento de imagens digitais
(CCD astronómicas e DSLR comerciais).**



<http://www.astrosurf.com/buil/us/iris/iris.htm>