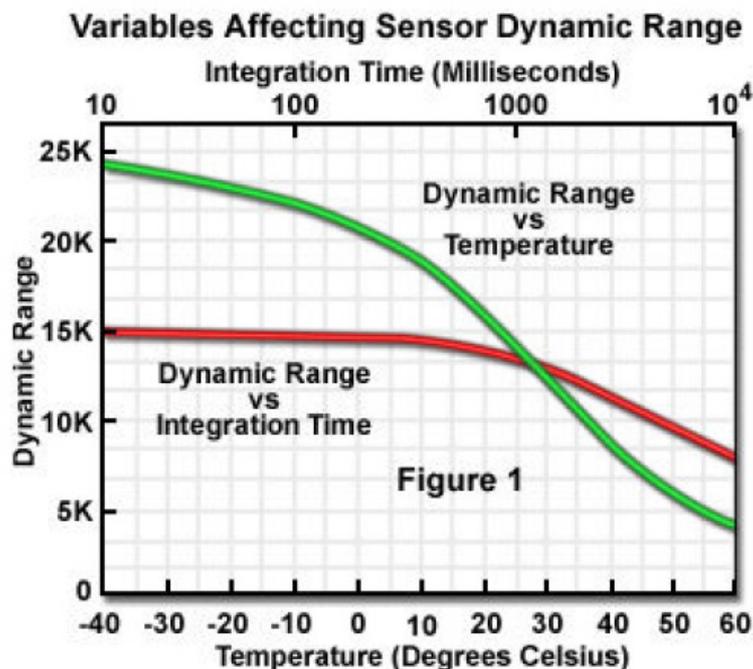


# ALCANCE DINÂMICO

Nos sensores de imagem **CCD** (*charge-coupled device*) ou **CMOS** (*complementary metal oxide semiconductor*), o alcance dinâmico (ou dinâmica) é especificado tipicamente como a razão entre o sinal máximo alcançado e o ruído. A intensidade do sinal é determinada pela capacidade máxima do foto-sensor (pixel) acumular carga (poços de potencial), e o ruído é a soma dos ruídos (de corrente negra e de *offset*). Se num dispositivo temos um alcance dinâmico maior, aumenta a possibilidade de medir quantitativamente as intensidades mais ténues na imagem. O alcance dinâmico representa o espectro de intensidades que se pode adoptar quando a amplificação do detector, o tempo de integração, a abertura da objectiva e demais variáveis se ajustam para diferentes campos de visão.



O tamanho do pixel determina em parte, o tamanho dos poços de potencial – pixels maiores têm mais capacidade de armazenar cargas, em comparação com o ruído da câmara. O tamanho normal dos CCD modernos utilizados em fotografia varia entre 4,5 a 24 micrómetros ( $\mu$ ), com capacidades de armazenamento correspondentes entre 20.000 a 600.000 electrões, respectivamente. O ruído de leitura é uma combinação de todo os ruídos gerado durante a leitura do dispositivo. Este inclui o ruído do relógio de entrada e padrão fixo, junto com o ruído de *reset* do transístor e o ruído do amplificador de saída. O ruído de leitura vem normalmente especificado nas folhas técnicas que acompanham os dados de rendimento do sensor CCD, e exibe valores típicos entre 10 a 20 electrões por pixel em *chips* de alta qualidade (funcionando à temperatura ambiente) e de 2 a 5 electrões por pixel em *chips* CCD arrefecidos por elementos *Peltier*, normalmente

empregues na obtenção de imagens digitais de aplicações científicas. O alcance dinâmico é expresso em unidades de decibel, segundo a seguinte expressão:

$$\text{Alcance Dinâmico} = 20 \times \text{Log} (N_{\text{sat}} / N_{\text{ruído}}) \quad (1)$$

com;

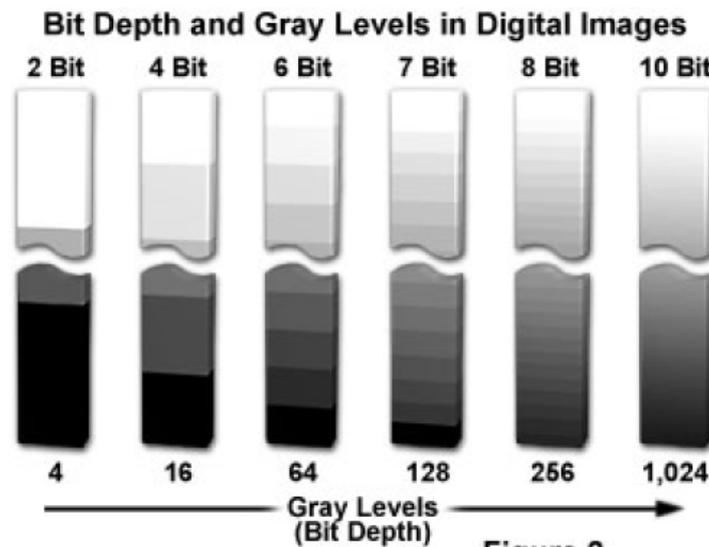
$N_{\text{sat}}$  - a capacidade máxima de armazenamento de electrões (poços de potencial) – expressa no número de electrões,

$N_{\text{ruído}}$  – o valor total dos ruídos, também expresso pelo seu número de electrões.

Nas câmaras arrefecidas de um CCD de alto rendimento, a capacidade de poço é directamente proporcional ao tamanho do pixel individual, de tal forma que o número máximo de electrões armazenados é da ordem de 1.000 vezes a área transversal de cada um. Desta maneira, um CCD de pixéis quadrados com  $6.7\mu \times 6.7\mu$  de lado, deve ter uma capacidade de armazenamento máxima de aproximadamente 44.890 electrões. Com uma velocidade típica de leitura de 1 MHz, o ruído do CCD é de aproximadamente 10 electrões por pixel, o que significa um alcance dinâmico de 4.489 (44.890/10). Para utilizar a gama completa de níveis disponíveis (na escala de cinzentos), com este alcance dinâmico – a câmara deverá ter um conversor analógico-digital (ADC) de 12-bits, que tem a capacidade de resolver 4.096 níveis de cinzento ( $4.096=2^{12}$ ), do preto (0) ao branco (4.095). A quantificação e controlo dos ruídos é um factor crítico na definição e uso do nosso alcance dinâmico, se o queremos o mais elevado possível.

Os sensores CCD arrefecidos de alto rendimento desenhados com amplificadores de saída de baixo ruído, apropriados para utilizações em que a produção de imagens é lenta, têm normalmente um ruído muito baixo e uma alcance dinâmico extenso. Por exemplo, o sensor CCD39-01, da *Tecnologias Aplicadas Marconi* (do tipo *back illuminated*) têm um tamanho de pixel quadrado de  $24 \mu\text{m}$  de lado, com um registro de saída dividido que permite o uso de amplificadores de saída quad. A capacidade de armazenamento deste dispositivo pode alcançar um nível máxima de 300.000 electrões. O seu ruído de leitura *root-meansquare* (rms) é de apenas 3 electrões a 20 kHz (quando está arrefecido). O CCD39-01 é capaz de ter um alcance dinâmico de aproximadamente 100.000:1. Para fazer pleno uso de todo este potencial do CCD, deveríamos utilizar um conversor ADC de 17-bits, que tem 131.072 níveis distintos de escala de cinzentos (ainda que um conversor ADC a 16-bits, com  $65.536 = 2^{16}$  níveis pudesse ser suficiente). O alcance dinâmico de um CCD depende assim de várias variáveis. A corrente negra é fortemente influenciada pela temperatura do sensor (Figura 1), duplicando tipicamente a cada 8 a 10 graus Celsius de aumento de temperatura. Com temperaturas mais altas domina a corrente negra, e com temperaturas mais baixas, o alcance dinâmico é determinado pelo ruído do amplificador de saída. A quantidade de carga eléctrica originada no ruído escuro, em cada pixel, depende não só da temperatura do sensor mas também do intervalo de tempo de integração e do tempo de armazenamento prévio á leitura. O nível de ruído é também proporcional á largura

de banda do amplificador de leitura, que por sua vez é função da velocidade de transferência dos píxeis, que depende da frequência do relógio. À medida que aumenta a frequência do relógio, o número de electrões de corrente negra diminui proporcionalmente e o amplificador de saída e o sistema de processamento de vídeo necessitam de menor largura de banda. O tempo de integração também afecta o alcance dinâmico de um CCD, como podemos ver na figura 1. Um aumento de tempo de integração total produz um aumento na corrente negra, e por conseguinte uma diminuição no alcance dinâmico, mas este efeito só é muito notório quando o tempo de integração é grande (ordem de minutos).



A profundidade de bit refere-se a gama binária dos valores possíveis na escala de cinzentos utilizadas pelo conversor ADC, para traduzir a informação analógica da imagem a valores digitais discretos, que o computador consegue ler e analisar. Por exemplo, os conversores ADC a 8-bits A/D têm uma gama binária de  $2^8 = 256$  valores possíveis (Figura 2), enquanto um conversor ADC de 12-bits têm um alcance de  $2^{12} = 4.096$  valores, e um conversor a 16-bits tem  $2^{16} = 65.536$  valores possíveis. A profundidade de bit do conversor ADC determina os incrementos da escala de cinzentos. Assim, as profundidades maiores têm correspondentemente um campo maior de informação útil disponível para a câmara. Obtemos melhores resultados se o sinal for amostrado (*sampled*) a um nível abaixo do limite sugerido pelo ruído de leitura. Por exemplo, para o CCD39-01 se usarmos um conversor ADC a 18-bits (que corresponde a 262.144 níveis de cinzentos) amostraríamos a nosso sinal em 1 parte por 262.144. Mas como já vimos para este sensor, o alcance dinâmico diz-nos que não se podem medir com precisão dados da imagem a mais do que uma parte em 100.000. Claramente, um conversor ADC a 18-bits será melhor que um a 16-bits, mas com um *chip* do tipo do CCD Marconi 39-01, o resultado será, com qualquer um destes ADC, muito bom. Pelo contrário, foi demonstrado que o *Fujichrome Velvia*, um filme diapositivo a cores de grão fino, produz menos de 10 stops (1024 níveis de cinzento) de alcance dinâmico.

A Tabela 1 apresenta a relação entre o número de bits empregues para representar a informação digital, o equivalente numérico aos níveis da escala de cinzentos e os valores correspondentes em decibéis (um bit equivale aproximadamente a 6 decibéis). Como se mostra na tabela, se digitalizar-mos um sinal vídeo de 0,72 V com um conversor ADC com um bit de precisão, o sinal era representado em valores binários, 0 ou 1, com valores em volt de 0 e 0,72. A maioria dos digitalizadores que se encontram nas câmaras digitais de aplicação comum, usam conversores ADC a 8-bits, que tem 256 níveis discretos para representar as amplitudes da voltagem. Um sinal máximo de 0,72 V fica então dividido em 256 etapas, cada uma delas com um valor de 2,9 mV.

#### Bit Depth and Dynamic Range of Charge-Coupled Devices

Bit Depth	Grayscale Levels	Dynamic Range (Decibels)
1	2	6 dB
2	4	12 dB
3	8	18 dB
4	16	24 dB
5	32	30 dB
6	64	36 dB
7	128	42 dB
8	256	48 dB
9	512	54 dB
10	1,024	60 dB
11	2,048	66 dB
12	4,096	72 dB
13	8,192	78 dB
14	16,384	84 dB
16	65,536	96 dB
18	262,144	108 dB
20	1,048,576	120 dB

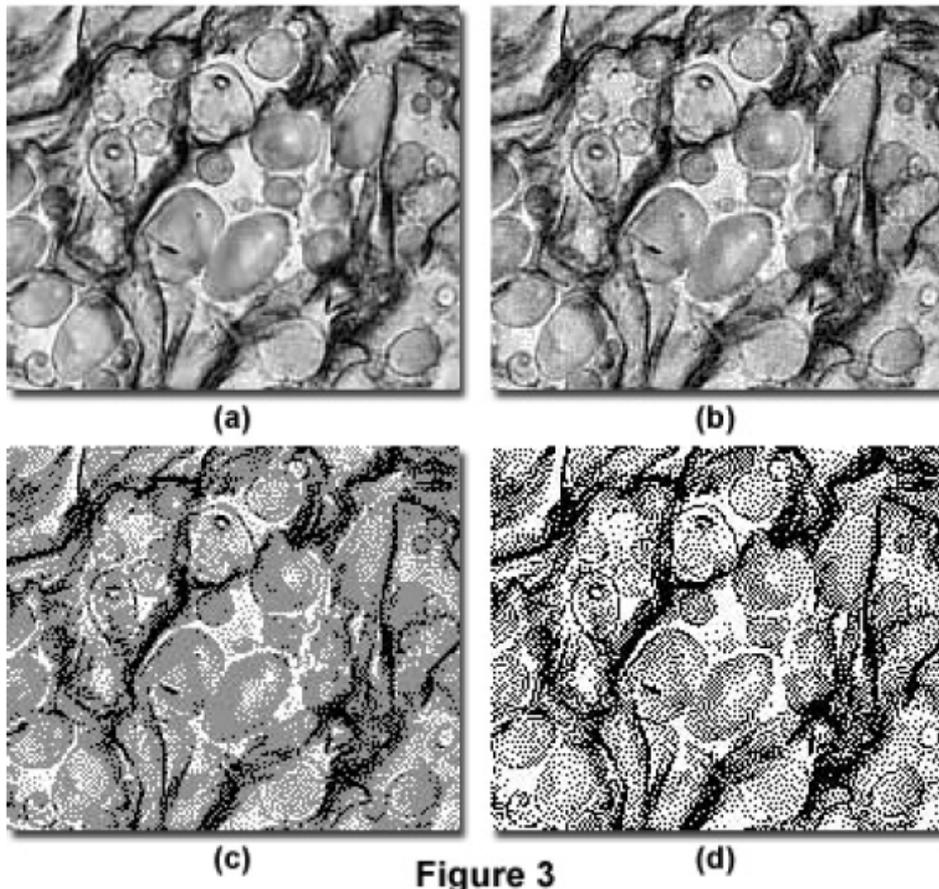
Tabela 1

O número de níveis na escala de cinzentos que se devem gerar para conseguirmos uma qualidade visual aceitável, deverá ser tal que as variações entre os valores individuais de cinzentos não sejam discerníveis pelo olho humano. A “mínima diferença perceptível” na intensidade de uma imagem, a nível de cinzentos, para a média do olho humano é de aproximadamente 2% em

condições visuais ideais. Assim, quando muito o olho humano pode distinguir 50 sombras discretas de cinzentos, no âmbito de intensidades de um monitor de vídeo, o que significa que o alcance dinâmico mínimo de uma imagem se encontra entre 6 e 7-bits (64 e 128 níveis na escala de cinzentos, figura 2).

As imagens digitais deveriam ter pelo menos uma resolução de 8-bits para evitar produzir variações de cinzentos visualmente obvias na imagem processada, se o contraste aumentar durante o processamento da mesma. O efeito da redução do número de níveis, na escala de cinzentos, na aparência das imagens pode ser observado na figura 3, que mostra uma imagem a preto e branco (originalmente a 8-bits) de uma secção fina de uma batata, que se visualiza com diferentes resoluções, entre 6-bits (figura 3a), 5-bits (figura 3b), 4-bits (figura 3c) e 3-bits (figura 3d).

### Grayscale Resolution and Image Appearance



Adaptado de:

Kenneth R. Spring - Scientific Consultant, Lusby, Maryland, 20657.

Michael W. Davidson - National High Magnetic Field Laboratory, 1800 East Paul Dirac Dr., The Florida State University, Tallahassee, Florida, 32310.