

Introdução às Cores

A Computação Gráfica estuda, basicamente, como gerar e analisar imagens. Dentro deste estudo, as cores são um elemento central, portanto devem ser vistas antes de qualquer outro. Como as cores são um assunto complexo, muitos autores preferem não iniciar o estudo de CG por ele. Como, entretanto, a referência às cores é inevitável, elas são normalmente apresentadas como consistindo de um vetor de três componentes: vermelha, azul e verde. O racional mais utilizado para esta abordagem advém do fato de que é assim que os monitores funcionam.

Este capítulo procura apresentar as cores de uma maneira um pouco mais fundamentada, focando em o que são, como as percebemos e quais as tecnologias de que dispomos para reproduzi-las. Para evitar que o assunto se torne muito extenso, omitimos tudo que não fosse estritamente necessário para um bom embasamento para a leitura dos próximos capítulos. Num capítulo posterior vamos tratar este assunto de uma forma mais aprofundada, enfocando principalmente os Sistemas de Gerenciamento de Cor.

Luz

As cores são sensações que temos em resposta à luz que incide nos nossos olhos. Por isso, para entendermos as cores, precisamos antes entender a luz.

A luz exhibe algumas propriedades que a fazem parecer consistir de partículas. Outras vezes, comporta-se como uma onda, mas para o propósito introdutório deste capítulo a luz pode ser modelada como uma onda eletromagnética que viaja no vácuo a uma velocidade c , de aproximadamente 300.000 Km/seg. No ar a velocidade é reduzida em cerca de 0,3% e na água em aproximadamente 25%. Ou seja, mesmo na água a luz viaja centenas de quilômetros em um milésimo de segundo, portanto para fins práticos, dentro das dimensões de cenários, ela é instantânea. Quando acendemos a luz o ambiente se ilumina e não a vemos se propagar de um lado a outro até chegar a nós. Por isso os modelos da Computação Gráfica não se preocupam com fases transientes que ocorrem entre o acender e o perceber a luz.

Analisando a luz como uma onda, podemos relacionar o comprimento de onda λ e a frequência f com a velocidade, v , através de

$$v = \lambda f \tag{1}$$

como ilustra a Fig.1. Nesta figura, o comprimento de onda λ é a distância percorrida pela onda em um ciclo. Como a frequência é medida em ciclos por segundo (Hertz), a distância percorrida pela onda em um segundo é λf .

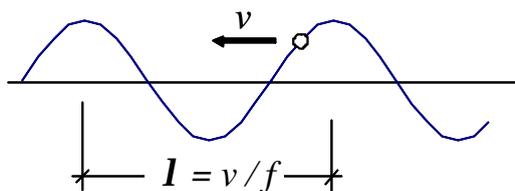


Fig. 1- Relação ente comprimento e velocidade de onda.

A Fig. 2 mostra as ondas eletromagnéticas classificadas pela freqüência f (ou por λ). O ponto interessante nesta figura é a pequena largura do espectro de freqüências que excitam nossos olhos, o chamado *espectro visível*. Ele vai do vermelho (4.3×10^{14} hz), passando pelo laranja, amarelo, verde e azul, até chegar ao violeta (7.5×10^{14} hz). Este espectro de cores é o mesmo que observamos no arco-íris.

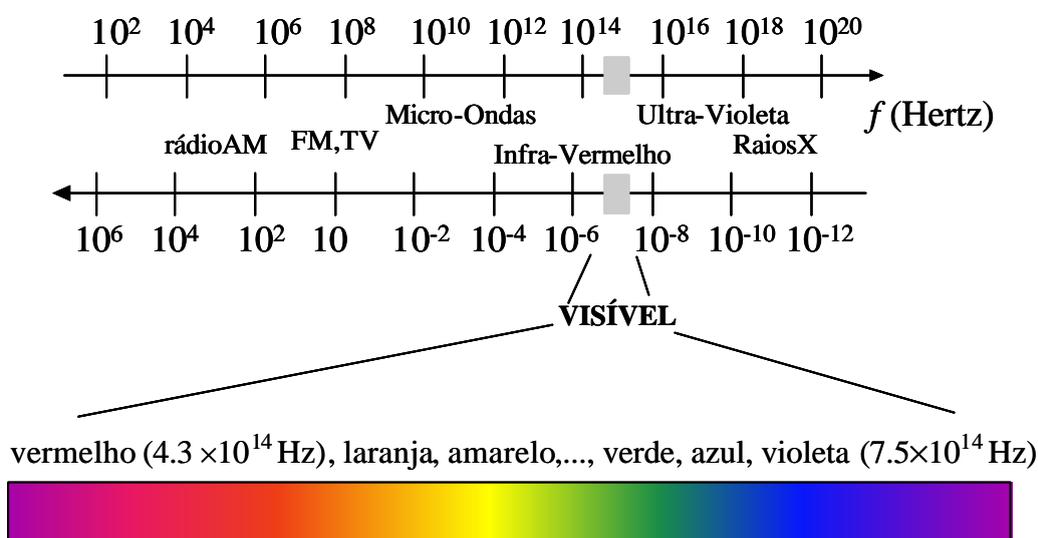


Fig. 2 - Espectro visível.

A explicação do arco íris é parecida à do prisma de vidro colocado em uma janela, que produz o mesmo espectro de cores na parede do cômodo. Este fenômeno foi observado por Newton quando ele concluiu que a luz branca é composta de todas as outras cores. A Fig. 3 ilustra o que ocorre com o prisma. A propriedade física que permite decompor a luz branca está relacionada com a refração diferenciada de cada componente, ou seja, no vidro de um prisma as componentes de menor comprimento de onda refratam mais.

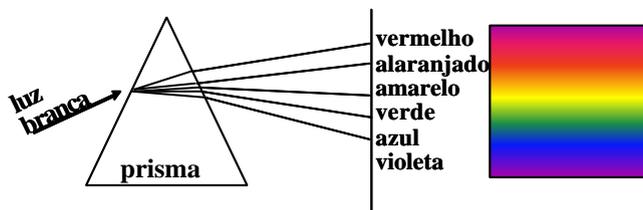


Fig. 3 - Luz branca decomposta em todas as cores.

Uma maneira de caracterizar a luz de uma fonte é definir a função que mostra a quantidade de energia que ela possui em cada um dos comprimentos de onda do espectro visível. A Fig. 4 mostra dois espectros de luz: uma branca e outra colorida. A Tab.1 mostra as

sensações de cores produzidas por fontes coloridas em função de seus comprimentos de onda.

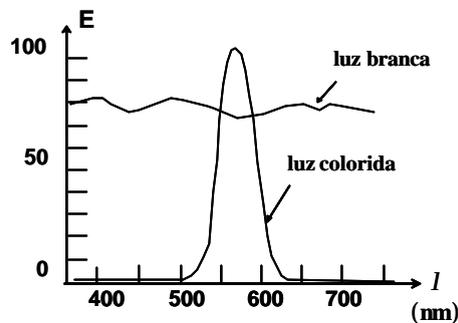


Fig. 4 - Espectros de luz ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).

Cor	λ
Violeta	380-440 nm
Azul	440-490 nm
Verde	490-565 nm
Amarelo	565-590 nm
Laranja	590-630 nm
Vermelho	630-780 nm

Tab.1 - Sensações de cores de fontes mono-freqüência no espectro visível.

As três características básicas do espectro de uma fonte de luz, **matiz**, **brilho** e **saturação**, podem ser determinadas a partir do seu espectro, como ilustra a Fig. 5. A matiz (ou *hue* em inglês) é definida pelo comprimento de onda predominante. A variação do comprimento de onda reproduz as cores que vemos no arco-íris. O brilho representa a intensidade da fonte, que pode ser medida pela área do gráfico. Finalmente, a saturação ou pureza é definida pela predominância da componente da matiz. Quanto mais concentrado o gráfico do espectro da fonte, maior a saturação. Inversamente, quando a luz se aproxima da luz branca, ela tem baixa saturação. As cores pastéis, usadas em quartos de bebês, são exemplos de cores pouco saturadas.

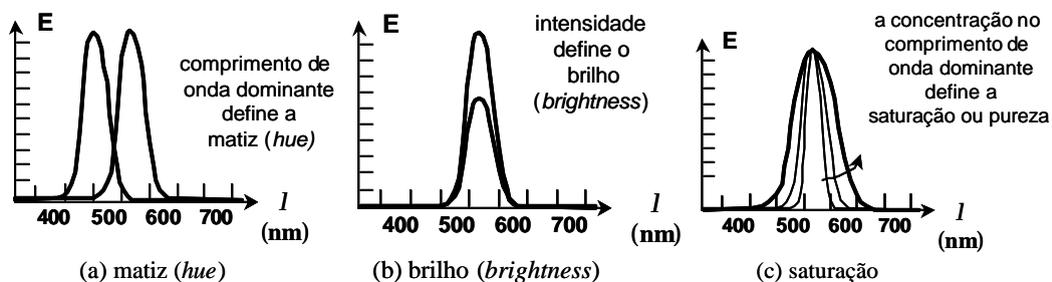


Fig. 5 - Características de um espectro luminoso.

Percepção visual

Apesar dos animais serem providos de percepção de cores, as cores que estudamos neste capítulo são sensações humanas em resposta à luz que incide em nossos olhos. O nosso olho recebe, através de um sistema de lentes, os raios de luz que incidem diretamente sobre ele, como ilustra a Fig. 6.

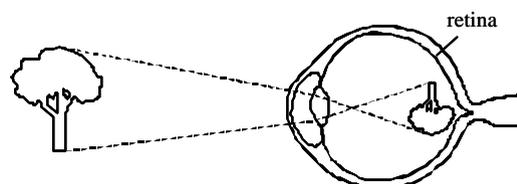


Fig. 6 - Esquema do olho humano.

Na retina de nossos olhos existem duas classes de sensores que captam luz. Devido à sua forma geométrica, estes sensores recebem os nomes de **cones** e **bastonetes**. Os bastonetes nos permitem enxergar em ambientes muito pouco iluminados, como numa noite com apenas luz de estrelas, e não transmitem sensação de cor, ou seja, são cegos para as cores. Com toda a iluminação artificial que nos cerca este tipo de visão é, atualmente, muito pouco utilizada. Este fenômeno também pode ser observado ao estudarmos os olhos dos animais. Os pombos, por exemplo, não possuem bastonetes e por isso só enxergam com bastante luz. As corujas, por outro lado, possuem apenas bastonetes e têm uma excelente visão noturna.

Os cones, por outro lado, são fundamentais para a sensação de cor. Existem três tipos diferentes de cones, cada um respondendo melhor a uma determinada faixa de frequências da luz. A Fig. 7 mostra resultados experimentais de sensibilidade de cada um destes cones que correspondem à sensação de vermelho (r para *red*), verde (g para *green*) e azul (b para *blue*) em função do comprimento de onda.

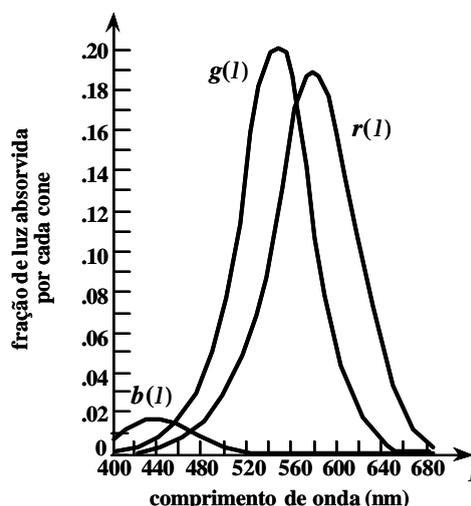


Fig. 7 - Absorção de energia luminosa pelos cones r , g e b em função de λ .

O fato de termos apenas três tipos de sensores cromáticos explica porque normalmente definimos as cores através de um modelo tricromático, ou seja, definindo cada cor através de três números. Um modelo matemático simples para determinarmos a medida da

intensidade de luz percebida pelos nossos cones quando excitados por uma luz de espectro $E(\lambda)$ (Fig. 4) é dado por:

$$R = \int E(I)r(I)dI, \quad G = \int E(I)g(I)dI, \quad B = \int E(I)b(I)dI \quad (1)$$

onde $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ e $b(\lambda)$ são as curvas de sensibilidade da Fig. 7.

Observando as diferentes capacidades de absorção de luz dos três cones podemos notar que o verde tem melhor absorção, seguido pelo vermelho e por último o azul. Assim, mesmo que uma fonte azul emita a mesma quantidade de energia luminosa que uma fonte verde, vamos perceber a luz verde como sendo mais intensa. É comum utilizarmos uma fórmula para determinar a quantidade de luz, L , que percebemos (**luminosidade**) do tipo:

$$L = 0.30R + 0.59G + 0.11B \quad (2)$$

Note a diferença entre luminosidade e brilho: o brilho é uma propriedade física da fonte de luz e a luminosidade depende da percepção humana. Ou seja, o brilho é uma intensidade de energia emitida pela fonte e normalmente medida em Watts, enquanto a luminosidade é a parcela desta energia que um ser humano normal percebe e é medida em candelas ou em lumens.

A Fig. 8 mostra outra curva experimental que relaciona a capacidade relativa do olho humano de perceber a luz em função do seu comprimento de onda. A característica de começar e terminar de perceber gradualmente é compatível com as curvas dos cones mostradas na Fig. 7, nas quais o cone azul está numa ponta do espectro e tem menor sensibilidade que o cone verde, que fica na região central.

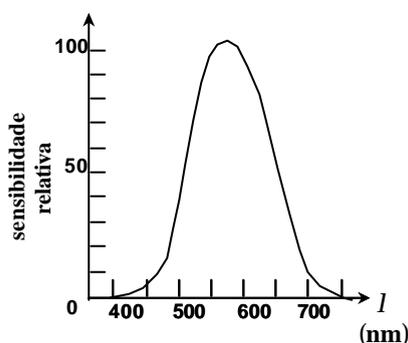


Fig. 8 - Sensibilidade do olho humano a diferentes comprimentos de onda.

Outro aspecto importante do olho humano é sua capacidade de se adaptar a diferentes níveis de luminosidade do ambiente que nos cerca. A Tab. 2 mostra a quantidade de lumens por metro quadrado que incide nas superfícies que nos rodeiam. Para entendermos melhor como nosso sistema de visão funciona, consideremos duas situações cotidianas: entrar num túnel e observar o céu de dia e de noite.

Quando entramos num túnel em um dia ensolarado, por exemplo, a quantidade de luz que penetra nos nossos olhos cai em mais de cem vezes. Por alguns instantes não vemos nenhuma luz, mas logo em seguida nossos olhos se adaptam e passamos a enxergar dentro do túnel. É como se tivéssemos trocado nossos olhos por outros mais sensíveis à luz.

O mesmo fenômeno ocorre quando estamos olhando para o céu. No período noturno enxergamos a Lua e as estrelas, mas no período diurno não conseguimos mais vê-las,

apesar delas estarem lá. É como se à noite tivéssemos olhos mais sensíveis, capazes de perceber intensidades mais baixas.

O que ocorre é que a quantidade de luz que penetra nos nossos olhos é administrada pela nossa retina sem um controle consciente. Ou seja, ela se abre e se fecha de forma a manter o fluxo de luz constante. Como não controlamos nem sentimos este processo de abrir e fechar, a intensidade luminosa é para nós uma grandeza relativa. Num ambiente com diversas superfícies brancas, por exemplo, percebemos a superfície de maior luminosidade como branca e as outras como cinza. Se introduzirmos uma superfície mais brilhante na cena, ela se torna a branca e anterior vira cinza. Isto também pode ser observado se numa sala escura com uma tela branca iluminamos um círculo, como mostra a Fig. 10(a). Se em seguida acrescentarmos outra luz no centro do círculo, gerando um espectro mais brilhante, vamos interpretar este como sendo o branco e o anterior se torna cinza. Ou seja, a nossa percepção de luminosidade é relativa.

Ambiente	lux (lumens/m ²)
Luz do dia (máximo)	100.000
Luz de dia sombrio	10.000
Interior próximo a janela	1.000
Mínimo p/ trabalho	100
Lua cheia	0,2
Luz das estrelas	0,0003

Tab. 2 - Intensidades luminosas normais.

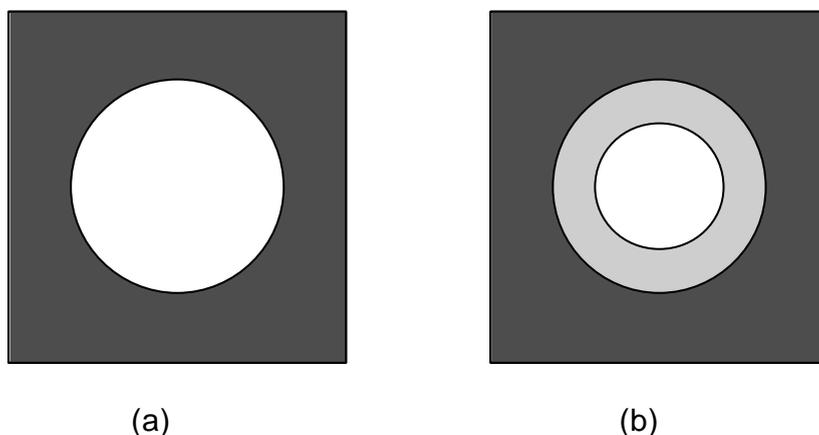


Fig. 10 - Percepção relativa da luminosidade.

Note que o círculo maior da Fig. 10(b) está com as cores modificadas para explicar o efeito numa folha de papel. Outro experimento que ilustra esta percepção relativa é mostrado na Fig. 11. A impressão que temos é que o quadrado central da esquerda é mais claro que o da direita, quando na verdade eles são da mesma cor. O contexto de cada um faz com que o cérebro deduza a diferença erroneamente.

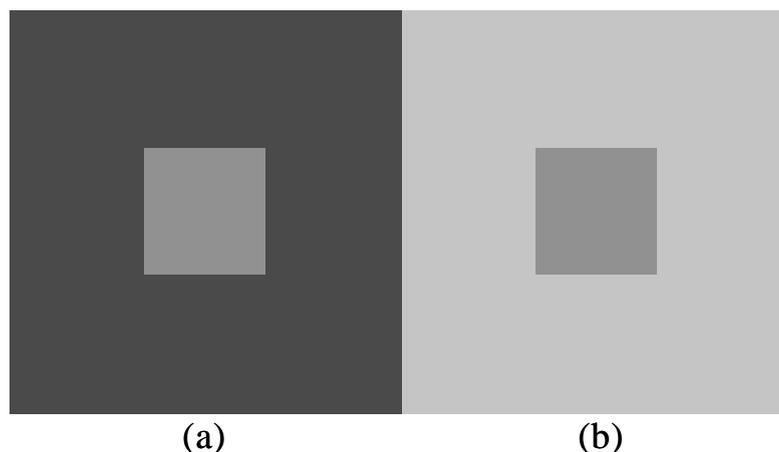


Fig. 11 - Contraste simultâneo.

Processos de formação de cores

Em nossa discussão até agora estamos entendendo que a luz vem de uma fonte com uma determinada distribuição espectral. Ocorre, entretanto, que normalmente os raios de luz que nossos olhos recebem vêm de diversos processos de interação com os meios pelos quais eles passam. Quando a luz sai de um meio para outro, parte dela é refletida na superfície de interface, parte é absorvida pelo novo material e parte refrata e continua.

Podemos dizer, por exemplo, que a luz solar, que predomina durante o dia, refrata na atmosfera terrestre e reflete na superfície de pisos, paredes e da natureza que nos cerca antes de atingir nossos olhos. Apesar de nosso olho só captar os raios de luz que incidem diretamente sobre ele, somos capazes de ver a luz solar mesmo quando não estamos olhando diretamente para o Sol.

As superfícies à nossa volta refletem a luz de acordo com as propriedades de seus materiais e, conseqüentemente, a luz normalmente chega até nós bastante modificada depois de muitas reflexões e refrações. Grande parte dos trabalhos de síntese de imagens realistas lida com o desenvolvimento de modelos e algoritmos para simular estas interações.

Existem diversos processos de formação de cores e neste capítulo abordaremos os dois mais importantes para a Computação Gráfica: o processo **aditivo** e o processo **subtrativo**. O primeiro é usado em monitores e projetores e o segundo em impressoras.

A Fig. 12 ilustra a idéia básica do processo aditivo de cores com duas lanternas de luz com espectros diferentes E_a e E_b incidindo sobre uma parede branca. A região comum à reflexão de ambas as lanternas tem um espectro correspondente à soma dos espectros de cada lanterna. Ou seja:

$$E_{a+b}(\mathbf{I}) = E_a(\mathbf{I}) + E_b(\mathbf{I}) \quad (3)$$

como seria de se esperar. Acontece que nossos olhos não são capazes de identificar que o espectro resultante veio de uma soma de duas componentes. Ao contrário do que ocorre com a audição, que é capaz de identificar a combinação de duas vozes como sendo um conjunto de dois, a nossa percepção visual “vê” a luz resultante como sendo uma nova luz. É neste princípio que se baseiam os projetores de três canhões (RGB). Cada canhão projeta

numa tela uma imagem em uma das suas três cores primárias e nós percebemos a imagem como colorida. A menos que os canhões estejam desalinhados, não conseguimos notar a separação de cores.

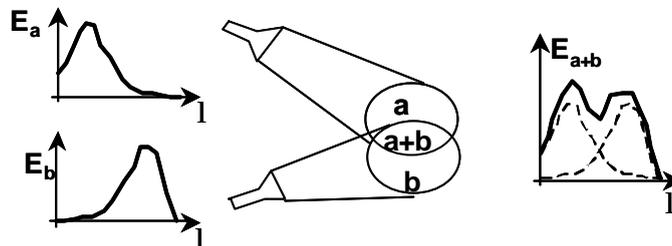


Fig. 12 - Processo aditivo de cores: soma de espectros.

Os monitores também são baseados em um processo aditivo de cores, mas para compreendê-lo precisamos ver mais uma característica do olho humano. Se a superfície de um determinado objeto possui diversas cores e este objeto é continuamente reduzido ou afastado de nossos olhos, a partir de um certo tamanho percebido não somos capazes de diferenciar as cores individualmente, mas vemos um ponto com uma nova cor correspondente à soma dos espectros de cada cor original. Isto permite que, na tela de um monitor, possamos ter pequenas células, denominadas *pixels* (*picture elements*), compostas de partes vermelhas, verdes e azuis. A Fig. 13 ilustra este processo.

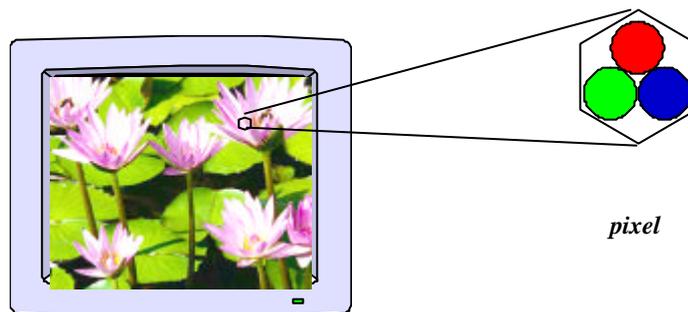


Fig. 13 - Formação de cores em monitores.

Considerando as cores RGB (vermelha, verde, azul) como primárias, podemos combiná-las aditivamente produzindo outras cores. A soma de vermelho e verde, por exemplo, produz o amarelo (Y para *Yellow*), a soma de verde e azul o ciano (C para *Cyan*) e a soma de vermelho com azul o magenta (M para *Magenta*). Se somarmos todas as componentes básicas teremos o branco (W para *White*) e se não somarmos nada teremos o preto (K para *Black*). Uma maneira mais organizada de apresentarmos este processo é o cubo RGB mostrado na Fig. 14. Note que neste cubo arbitramos os valores de cada componente para variar de 0 a 1 (0% e 100%). Devido a aspectos de implementação é comum termos dispositivos em que as componentes variam de 0 a 255 (0% e 100%). Assim elas ocupam apenas um *byte* de memória cada.

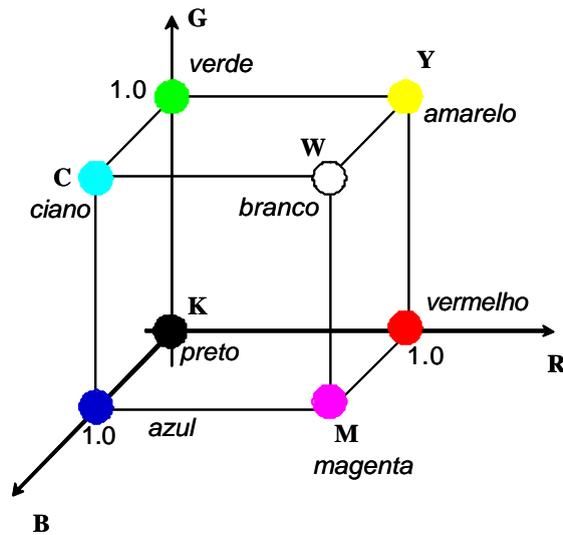


Fig. 14 - Cubo RGB.

O processo subtrativo funciona como ilustra a Fig. 15: um fecho de luz branca de uma lanterna passa por um filtro verde (um papel celofane verde, por exemplo) e projeta uma luz verde. O que ocorre neste processo é que a luz que atravessa o filtro tem cada uma de suas componentes espectrais reduzida pela transparência do filtro. Ou seja:

$$E_f(\lambda) = t(\lambda)E(\lambda) \quad (4)$$

Note que o próprio fato de vermos o filtro como verde já é uma demonstração deste fenômeno. Se levarmos este filtro para um ambiente iluminado apenas com luzes vermelhas e verdes, veremos o filtro como sendo preto (opaco). É claro que para esta experiência funcionar perfeitamente são necessários luzes e filtros com propriedades garantidas. Provavelmente o celofane da papelaria não vai atender a este requisito, mas mesmo assim podemos observar o fenômeno.

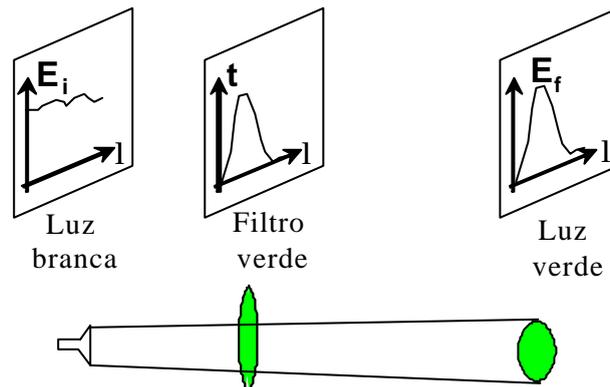


Fig. 15 - Uso de filtro para exemplificar o processo subtrativo de cores.

Se colocarmos um filtro ciano sobre um papel branco também vamos perceber a cor ciano. Isto porque, como ilustra a Fig. 16, os raios de luz branca que normalmente temos no nosso ambiente atravessam o filtro duas vezes, uma vez atingindo o papel e outra sendo refletidos por ele. Imaginando que a luz branca seja produzida por três projetores RGB, na primeira passada a componente vermelha é absorvida e a reflexão na superfície do papel já é ciano.

Este tipo de reflexão, denominado reflexão Lambertiana ou difusa, é muito importante não só para a impressão em papel, mas para praticamente todas as reflexões que ocorrem no nosso cotidiano.

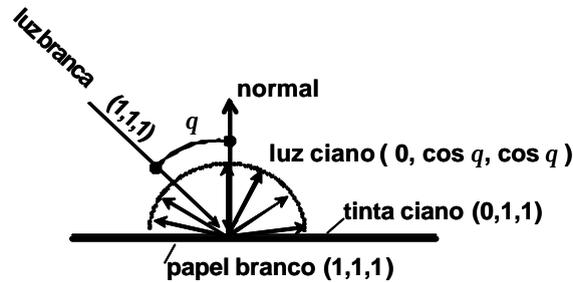


Fig. 16 - Reflexão difusa com filtro.

O modelo matemático adotado na Computação Gráfica para calcular as componentes (I_r , I_g , I_b) da luz refletida é:

$$I_r = k_{dr} I_r \cos q \quad (5.a)$$

$$I_g = k_{dg} I_g \cos q \quad (5.b)$$

$$I_b = k_{db} I_b \cos q \quad (5.c)$$

onde (k_{dr} , k_{dg} , k_{db}) são os coeficientes de reflexão difusa do material da superfície onde a luz reflete e (l_r , l_g , l_b) são as componentes da luz incidente. O ângulo q é o ângulo entre a luz incidente e a normal à superfície no ponto em que ela incide. Como $\cos q$ é sempre menor que 1, este fator corresponde a uma atenuação para levar em conta a direção em que a luz incide. Este assunto será melhor estudado quando tratarmos especificamente de modelos de iluminação. Por enquanto basta lembrarmos que as componentes RGB da luz incidente são reduzidas (filtradas) pela superfície.

Continuando nosso experimento com o papel, podemos agora colocar um filtro amarelo entre o filtro ciano e o papel branco da Fig.16. Assim como o ciano retirou a componente vermelha da luz branca, o filtro amarelo vai retirar a componente azul do ciano, restando apenas a cor verde. A Fig. 17 ilustra este processo subtrativo através de três círculos, um ciano, um magenta e outro amarelo (CMY). A interseção do amarelo com o ciano produz o verde; a interseção do ciano com o magenta o azul e a interseção do amarelo com o magenta o vermelho. Na interseção dos três temos o preto e a ausência dos três filtros mantém o papel branco.

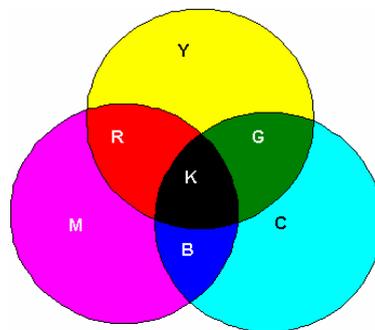


Fig. 17 - Processo CMY.

Um problema tecnológico deste processo de geração de preto para impressão em papel é a qualidade e o custo do preto produzido. O preto resultante gasta muita tinta e fica meio amarronzado. Para agravar ainda mais este problema, muitos trabalhos são impressos em preto e branco. A solução adotada para a maioria das impressoras de jato de tinta atuais foi acrescentar um cartucho de tinta preta e tratar a reprodução de cores como uma combinação subtrativa de ciano, magenta, amarelo e preto (CMYK).

Advertência

Além das cores dependerem do ambiente, a reprodução de uma determinada cor em um dado dispositivo depende características de fabricação daquele aparelho, que normalmente variam ao longo de seu uso. Este processo é bastante delicado e requer um bom Sistema de Gerenciamento de Cores associado a uma calibração constante. Quando a reprodução de cores tiver requisitos muito altos, muitos detalhes tecnológicos se tornam importantes.

Exercícios

- 1) Dado que a velocidade da luz no vácuo é de aproximadamente 3×10^8 m/s, qual a frequência da onda emitida por uma luz verde de $\lambda = 546$ nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)?
- 2) Como podemos verificar experimentalmente que a luz branca contém todas as componentes espectrais?
- 3) Explique o que é matiz, brilho e saturação de uma fonte luminosa.
- 4) Dada uma distribuição espectral de energia, como podemos determinar o comprimento de onda dominante e a pureza, a intensidade e a luminosidade da cor que ela representa?
- 5) O que é um processo subtrativo de formação de cores? Cite um exemplo de como podemos obter a cor vermelha através deste processo.
- 6) Por que as representações matemáticas de cores assumem que a cor pode ser representada por apenas 3 valores? Qual a dimensão do espaço vetorial das funções espectrais?
- 7) Por que quando a intensidade de luz no ambiente é muito baixa não temos sensação de cor? Que tipo de receptores temos nos olhos?
- 8) Por que a eficiência luminosa de uma luz azul é bem mais baixa que a de uma luz verde?
- 9) Desenhe o lugar geométrico dos pontos que têm valores de luminosidade (veja eq.2) constantes e iguais a 0,24, 0,50 e 0,75 no cubo RGB.
- 10) Pode uma mesma cor ser percebida como tendo intensidades diferentes por um mesmo ser humano?
- 11) Por que a evolução do sistema CMY para o sistema CMYK? Qual a relação entre eles? Quais as vantagens e desvantagens?