

Capítulo 7

Modelos de Cor

O termo luz é usado em dois sentidos. No sentido físico, luz é um feixe de ondas eletromagnéticas às quais o olho humano é sensível. No sentido psicofísico, a luz é a sensação produzida num observador quando a sua retina é estimulada.

(Ver Fig. 13.16 do livro-texto de Foley.)

A sensibilidade do olho humano varia do observador para observador. Para um mesmo observador, ela varia com a frequência da faixa espectral (faixa de comprimentos de onda visíveis) e produz distintos **estímulos cromáticos (cor)**. A cada comprimento de onda é associada uma **cor espectral**.

A faixa espectral, embora limitada, compreende um número infinito de comprimentos de onda o que, à primeira vista, impossibilitaria a definição de um modelo computacionalmente factível. Felizmente, graças à limitação da visão humana, os resultados conhecidos até hoje são suficientes para modelar e produzir uma variedade de cores comparável com a que vivenciamos no dia-a-dia.

Neste capítulo apresentaremos, em primeiro lugar, na seção 7.1 alguns termos relacionados com cores. Em seguida, na seção 7.2 faremos uma breve introdução às características relevantes da percepção visual de cores para Sistemas de Informações Gráficas. Veremos na seção 7.3 que, experimentalmente, concluiu-se que todo estímulo cromático pode ser obtido aditivamente a partir de três cores “primárias”, variando somente nas suas proporções e nas suas intensidades. Destes resultados foi possível estabelecer **modelos tricromáticos** que consistem em representar matematicamente as cores como pontos de um espaço de cores definido por três vetores linearmente independentes. Dois **padrões tricromáticos** serão apresentados.

Na seção 7.4 mostraremos como se representa o matiz do universo de cores através do **diagrama de cromaticidade**. Mostraremos ainda, com uso do diagrama de cromaticidade, como podemos prever o espaço de cores reproduzíveis por um dispositivo colorido. Finalmente, na seção 7.5 serão comentados os **modelos de cor** mais utilizados nos sistemas gráficos.

7.1 Terminologia

Os termos importantes associados a uma cor sob o ponto de vista perceptual são: matiz, saturação e brilho. Denomina-se **matiz** (*hue*) o atributo de sensação colorida que permite dizer se uma cor é verde ou azul. A **saturação** (*saturation*) é o atributo de sensação colorida que permite dizer se uma cor é mais clara ou mais escura. Chamamos de **brilho** (*lightness*) o atributo de sensação colorida que permite dizer se uma cor é mais ou menos “ofuscante”.

(Ver Fig. 13.17 do livro-texto de Foley.)

O matiz, a saturação e a claridade correspondem, respectivamente, ao **comprimento de onda dominante**, a **pureza na excitação** (“percentagem da luz branca”) e a **luminância** que são grandezas físicas da colorimetria.

Observação 7.1 Fotometria *trata do estudo das grandezas relativas à emissão e à recepção de radiações luminosas e da medição dessas grandezas. Colorimetria se ocupa dos métodos referentes à medição e avaliação das radiações luminosas percebidas pela visão humana.*

7.2 Percepção Visual

Vimos no capítulo 5 que a imagem de um objeto se forma sobre o plano retinal e que se distinguem na retina dois tipos de células: os cones e os bastonetes. Os cones são destinados à visão diurna, sendo sensíveis às diferenças de cor. Os bastonetes, por sua vez, são destinados à visão com pouca luz, como no caso de visão noturna, sendo insensíveis às diferenças de cor.

Com base em experimentos, foi proposto um modelo “triestímulo” para a visão humana (modelo de Young-Helmholtz). Este modelo se fundamenta no fato de que a retina possui essencialmente três tipos de cones que são, respectivamente, fotosensíveis às faixas de baixa, média e alta frequência do espectro visível, como comprovam os gráficos das funções de sensibilidade espectral.

(Ver Fig. 13.18 do livro-texto de Foley.)

Para um observador médio, a **função de sensibilidade espectral** do seu olho varia com o comprimento de onda. O máximo de sensibilidade corresponde à radiação de comprimento de onda igual a 545 nm (cor amarelo-esverdeada). Quando a iluminação não é muito boa, o máximo de sensibilidade se desloca para a faixa de 440 nm (cor próxima de azul). E para uma iluminação muito forte, o máximo da função se desloca para a faixa de 580 nm (cor próxima de vermelho).

Um resultado importante para Sistemas de Informações Gráficas é que, experimentalmente, mostrou-se que a partir das três cores correspondentes aos comprimentos de onda 440 nm , 545 nm e 580 nm é possível reconstruir qualquer cor espectral. Somente numa faixa entre as radiações azul e verde (onde o vermelho assume valores negativos), deve-se adicionar vermelho à cor-teste para que chegue a uma cor constituída por azul e verde.

Observação 7.2 *As três cores correspondentes aos comprimentos de onda 440 nm (azul), 545 nm (verde) e 580 nm (vermelho) são denominadas as cores primárias.*

(Ver Fig. 13.20 do livro-texto de Foley.)

Outro fato interessante é que o olho humano não consegue distinguir todas as cores espectrais. Exceto nos extremos da faixa espectral, cores distinguíveis devem ter, em média, mais de 4 nm de diferença no comprimento de onda. Quando as cores estiverem pouco saturadas, esse espaçamento é maior ainda. A sensibilidade visual para pequenas diferenças entre duas cores é de fundamental importância para definir a resolução de um sistema gráfico. Sabe-se que esta sensibilidade depende da tonalidade, da saturação e das cores adjacentes.

(Ver Fig. 13.21 do livro-texto de Foley.)

A **eficiência luminosa** do olho é a sensibilidade do olho a uma luz de luminância constante, variando somente no comprimento de onda dominante. O valor máximo da **função de eficiência luminosa espectral** corresponde ao comprimento de onda dominante igual a 545 nm .

(Ver Fig. 13.19 do livro-texto de Foley.)

A cada composição espectral corresponde um estímulo cromático (uma única cor). Entretanto, um mesmo estímulo cromático pode ser causado por distintas composições espectrais que são denominadas **metâmeras**. Como uma mesma radiação visível pode produzir sensação de cor diferente em observadores diferentes, duas cores metâmeras para um observador podem não as serem para outro.

7.3 Modelos Tricromáticos

Os experimentos com as três cores primárias permitiram estabelecer três leis de **misturas aditivas de cores**, conhecidas como **leis de Grassman**:

1. Podemos especificar qualquer cor como mistura aditiva de três cores independentes.
2. A cor de uma mistura aditiva não se altera quando substituimos as cores componentes pelas suas metâmeras.
3. Se uma componente de uma mistura aditiva é alterada numa dada proporção, a cor da mistura é modificada na mesma proporção, obedecendo as leis de simetria, transitividade e linearidade.

A cada cor C é definida uma **cor complementar** $-C$ de forma que a soma das duas cores resulta em uma **luz acromática** (“cor branca”). Uma luz acromática, ou cor branca, é uma cor que adicionada a qualquer outra não altera o matiz da cor, mas sim só a sua saturação ou pureza. Estas propriedades junto com a estrutura aditiva linear das cores ($\alpha(C_1 + C_2) = \alpha C_1 + \alpha C_2$, onde α é um fator não-negativo de acréscimo na potência radiante estimulante) nos permitem dizer que o conjunto de cores provido da operação de mistura aditiva e da multiplicação por fator de potência forma um **espaço (linear) de cores** de dimensão 3 gerado pelas três cores primárias $\{C_1, C_2, C_3\}$. Estas três cores primárias constituem a base de espaço, cuja origem corresponde a uma luz acromática (por exemplo, “cor” de luminância zero = preta).

(Ver Fig. 13.23 do livro-texto de Foley.)

Com base no que foi exposto, a Comissão Internacional de Iluminação (CIE) estabeleceu vários padrões de cor. O modelo mais conhecido em Sistemas de Informações Gráficas é o CIE-XYZ, que pode ser considerada uma versão melhorada do padrão CIE-RGB.

Observação 7.3 *CIE é o órgão responsável pela padronização na área de fotometria e colorimetria.*

7.3.1 CIE-RGB

Este modelo define como as três cores primárias as cores espectrais de comprimentos iguais a 435.8 *nm* (azul), 546 *nm* (verde) e 700 *nm* (vermelho). A função de reconstrução das cores espectrais a partir destas três cores mostra

que há uma faixa de cores espectrais que só podem ser reconstruídas com valores negativos de vermelho. Isso foi uma das razões para a CIE estabelecer o padrão CIE-XYZ.

(Ver Fig. 13.20 do livro-texto de Foley.)

7.3.2 CIE-XYZ

A solução que a CIE encontrou para estabelecer um padrão de cores no qual qualquer cor espectral possa ser definida como uma combinação não-negativa das cores primárias foi utilizar as cores primárias denominadas X , Y e Z . Embora não correspondam a cores espectrais, elas facilitam o cálculo das grandezas fotométricas uma vez que os valores Y são dados, por definição, pela função de eficiência luminosa espectral. As cores primárias do sistema CIE-XYZ, $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$ e $(0, 0, 1)$, que correspondem, respectivamente, às cores $(1, 2750, -0, 2779, 0, 0029)$, $(-1, 7395, 2, 7675, -0, 0280)$ e $(-0, 7431, 0, 1409, 1, 6022)$ em CIE-RGB, não são realizáveis fisicamente.

(Ver Fig. 13.22 do livro-texto de Foley.)

Uma cor no padrão CIE-XYZ pode ser transformada para uma correspondente no padrão CIE-RGB através da transformação

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,3647 & -0,89658 & -0,468083 \\ -0,51515 & 1,42641 & -0,088746 \\ -0,005203 & -0,01441 & 1,00921 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

A transformação inversa é dada por

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,489989 & 0,31008 & 0,20 \\ 0,176962 & 0,81240 & 0,01 \\ 0,0 & 0,01 & 0,99 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

Observação 7.4 As cores $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$ e $(0, 0, 1)$ em CIE-RGB correspondem, respectivamente, às cores $(0, 73467, 0, 26533, 0, 0)$, $(0, 27376, 0, 71741, 0, 00883)$ e $(0, 16658, 0, 00886, 0, 82456)$ em CIE-XYZ.

7.4 Diagrama de Cromaticidade

Com uso da Eq. 7.1 é possível transformar todas as cores espectrais representadas em CIE-RGB para o sistema CIE-XYZ. Uma cor espectral (x_s, y_s, z_s) com distintos valores de luminância estão sobre uma reta que passa pela origem. Para uma luminância fixa, as cores espectrais definem uma curva

no espaço. Se normalizarmos as coordenadas x_s , y_s e z_s destas cores em função da luminância ($x_s + y_s + z_s$) da cor, ou seja,

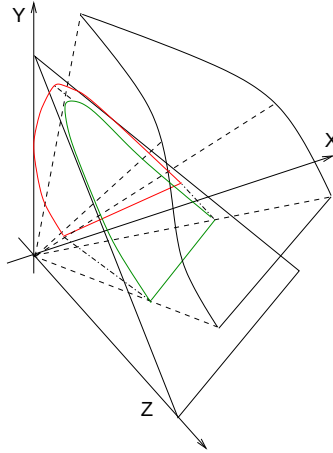
$$x_c = \frac{x_s}{x_s + y_s + z_s} \quad y_c = \frac{y_s}{x_s + y_s + z_s} \quad z_c = \frac{z_s}{x_s + y_s + z_s},$$

obteremos os pontos (x_c, y_c, z_c) sobre o plano $X + Y + Z = 1$, que é a “projeção” de todas as cores (x_s, y_s, z_s) ao longo da reta que passa pela origem e pela cor (x_c, y_c, z_c) . As cores (x_s, y_s, z_s) e (x_c, y_c, z_c) são homogêneas.

As cores sobre o plano $X + Y + Z = 1$ tem a mesma luminância, diferindo apenas no comprimento de onda dominante e na saturação; portanto, elas são denominadas os valores de **cromaticidade**. O triângulo com os vértices em $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$ e $(0, 0, 1)$ sobre o plano $X + Y + Z = 1$ é denominado **triângulo de Maxwell**. A curva constituída pelas cores espectrais está contida neste triângulo. Os extremos da curva correspondem, respectivamente, às duas cores dos extremos do intervalo da faixa espectral (de tonalidade azul e vermelho, respectivamente). A combinação linear destas duas cores resulta em diferentes tonalidades de cor púrpura. Portanto, este segmento é chamado **linha púrpura**.

(Ver Fig. 13.24 do livro-texto de Foley.)

A projeção ortográfica da curva de cores espectrais junto com a linha púrpura define o **diagrama de cromaticidade**. Lembrando que $z_c = 1 - x_c - y_c$, as duas coordenadas x_c e y_c do diagrama de cromaticidade são suficientes para caracterizar a **crominância** de uma cor.



Qualquer cor no sistema XYZ pode então ser especificada com uso das coordenadas de cromaticidade x_c e y_c e da informação de luminância Y através das expressões

$$Y = Y \quad X = \frac{x_c}{y_c} Y \quad Z = \frac{1 - x_c - y_c}{y_c} Y$$

ou da informação de X por meio das equações

$$X = X \quad Y = \frac{y_c}{x_c} X \quad Z = \frac{1 - x_c - y_c}{x_c} X$$

Observação 7.5 *A cor branca padrão corresponde a um ponto próximo de $(\frac{1}{3}, \frac{1}{3})$ no diagrama de cromaticidade.*

O diagrama de cromaticidade pode ser utilizado para analisar as cores em relação à cor branca C de um sistema de cores:

- Determinação do comprimento de onda dominante (matiz): é o lugar geométrico da interseção entre a curva das cores espectrais e a semi-reta que liga C e a cor de interesse. Se a intersecção estiver sobre a linha púrpura dizemos que a cor não é espectral.
- Determinação da pureza da cor (saturação): Se A for o matiz da cor de interesse B , então a razão entre $\overline{CB}$ e $\overline{CA}$ nos dá a pureza da cor.
- Determinação da cor complementar: Se A for o matiz da cor de interesse B , o matiz C no extremo oposto do segmento que une A e a cor branca de referência é a cor complementar de A , ou seja, se subtrairmos da cor branca de referência a distribuição espectral A , perceberemos a cor C .

(Ver Fig. 13.26 do livro-texto de Foley.)

O diagrama de cromaticidade é também muito utilizado para definir o **gamute de cor** que um dispositivo com base em mistura aditiva consegue exibir. Três cores primárias definem um gamute triangular.

7.5 Modelos de Cor em Sistemas de Informações Gráficas

Por conveniência, utilizam-se vários modelos em sistemas de informações gráficas para especificar a cor de um gamute. O modelo de cor mais conhecido para especificar uma cor nos monitores CRTs são os modelos RGB. Isso se deve ao fato da formação aditiva das cores a partir de três tipos de fósforos. Os modelos HSL e HSV são os mais apropriados para definir uma cor por parte do usuário, envolvendo os conceitos de tonalidade/matiz, saturação e o brilho.

Observação 7.6 Alguns principais algoritmos de conversão de modelos de cores são sintetizados em http://www.cs.rit.edu/~ncs/color/t_convert.html. Em http://www.csit.fsu.edu/~burkardt/f_src/colors/colors.html encontra-se uma lista de algoritmos de conversão implementados em C.

7.5.1 RGB

O modelo RGB utilizado nos monitores CRT e dispositivos gráficos *raster* usa um cubo unitário para especificar as cores. O gamute coberto por um monitor depende da cromaticidade dos fósforos que ficam na camada interna da tela. Portanto, há uma grande variação de gamutes entre os monitores.

(Ver Fig. 13.27 do livro-texto de Foley.)

Observação 7.7 O branco não é necessariamente igual entre os monitores. Consulte a tabela no site <http://www.efg2.com/Lab/Graphics/Colors/Chromaticity.htm>.

Um dos problemas em Sistemas de Informações Gráficas para obter imagens coloridas mais fiéis possíveis às exibidas por um outro dispositivo é determinar a cor especificada no gamute de um dispositivo $\mathcal{D}_1$ para a cor no gamute de um outro dispositivo $\mathcal{D}_2$. Para isso, pode-se utilizar o padrão CIE-XYZ como referência, transformando a cor do gamute de $\mathcal{D}_1$ definido pelas cores primárias $(x_{r,1}, y_{r,1})$, $(x_{g,1}, y_{g,1})$ e $(x_{b,1}, y_{b,1})$ para XYZ através de

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} R_1 \\ G_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{r,1}C_{r,1} & x_{g,1}C_{g,1} & x_{b,1}C_{b,1} \\ y_{r,1}C_{r,1} & y_{g,1}C_{g,1} & y_{b,1}C_{b,1} \\ z_{r,1}C_{r,1} & z_{g,1}C_{g,1} & z_{b,1}C_{b,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ G_1 \\ B_1 \end{bmatrix}$$

e depois da referência XYZ para o gamute do dispositivo $\mathcal{D}_2$ definido pelas cores primárias $(x_{r,2}, y_{r,2})$, $(x_{g,2}, y_{g,2})$ e $(x_{b,2}, y_{b,2})$

$$\begin{bmatrix} R_2 \\ G_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = M_2^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{r,2}C_{r,2} & x_{g,2}C_{g,2} & x_{b,2}C_{b,2} \\ y_{r,2}C_{r,2} & y_{g,2}C_{g,2} & y_{b,2}C_{b,2} \\ z_{r,2}C_{r,2} & z_{g,2}C_{g,2} & z_{b,2}C_{b,2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}.$$

Há duas formas para determinar os fluxos luminosos para as três cores $C_{r,i}$, $C_{g,i}$ e $C_{b,i}$ de um dispositivo i . Uma forma é com uso de um fotômetro para medir o nível de luminância máxima $Y_{r,i}$, $Y_{g,i}$ e $Y_{b,i}$ de cada cor primária do dispositivo i e depois substituí-los nas expressões

$$C_{r,i} = \frac{Y_{r,i}}{y_{r,i}} \quad C_{g,i} = \frac{Y_{g,i}}{y_{g,i}} \quad C_{b,i} = \frac{Y_{b,i}}{y_{b,i}}$$

A segunda forma é determinar a cor branca $(1, 1, 1)$ do dispositivo no sistema XYZ e utilizar estas coordenadas para obter $C_{r,i}$, $C_{g,i}$ e $C_{b,i}$ através da expressão

$$\begin{bmatrix} C_{r,i} \\ C_{g,i} \\ C_{b,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{r,i} & x_{g,i} & x_{b,i} \\ y_{r,i} & y_{g,i} & y_{b,i} \\ z_{r,i} & z_{g,i} & z_{b,i} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix}$$

7.5.2 NTSC YIQ

É utilizado na transmissão de sinais de televisão nos Estados Unidos. A coordenada Y é igual à coordenada Y do padrão CIE-XYZ, de forma que uma televisão preto-e-branco possa utilizá-la para exibir imagens coloridas em níveis de cinza. A correspondência entre as coordenadas YIQ e as coordenadas do modelo RGB padrão do NTSC (*National Television System Committee*) é dada por

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.144 \\ 0.596 & -0.275 & -0.321 \\ 0.212 & -0.528 & 0.311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}.$$

Observação 7.8 No padrão RGB do NTSC as cores primárias são $R = (0, 67, 0, 33)$, $G = (0, 21, 0, 71)$ e $B = (0, 14, 0, 08)$, considerando que a cor branca tenha as coordenadas $Y_w = 100.0$, $X_w = 0, 31 \frac{Y_w}{0,316}$ e $Z_w = (1 - 0, 31 - 0, 316) \frac{Y_w}{0,316}$.

7.5.3 CMY

É adequado para especificar as cores das impressoras coloridas que utilizam o processo subtrativo para formação de uma cor. Nestes dispositivos, os pigmentos ou corantes são depositados sobre a folha durante a “impressão”. Tais materiais funcionam como filtro, deixando somente que ondas de certos comprimentos sejam refletidas.

As três cores primárias deste modelo são ciano, amarelo e magenta. O ciano absorve o vermelho, o amarelo somente deixa refletir o vermelho e o verde; enquanto o magenta absorve as radiações correspondentes à cor verde.

(Ver Fig. 13.29 do livro-texto de Foley.)

7.5.4 HSV

Diferentemente dos modelos RGB, CMY e YIQ, o modelo HSV é orientado a usuários “leigos”, cuja especificação se baseia na forma como os artistas

referenciam às cores de tintas – tonalidade (H), sombra (V) e clareamento (S). O sólido de cor é um cone de seis lados. Os seis lados da base correspondem à projeção ortogonal do cubo unitário RGB na direção do diagonal principal do ponto que corresponde à cor branca para origem. Cada camada hexagonal com um valor V constante corresponde à projeção de um cubo interno com lado igual a V .

(Ver Fig. 13.30–13.32 do livro-texto de Foley.)