

# Modelos de Cor: Espectral ou RGB

SIMONE BACELLAR LEAL FERREIRA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>IMPA-Instituto de Matemática Pura e Aplicada  
Estrada Dona Castorina, 110 - 22460 Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
simone@impa.br

<sup>2</sup>INT-Instituto Nacional de Tecnologia  
Avenida Venezuela, 82 - 20081 Rio de Janeiro, RJ, Brasil

**Abstract.** Realistic image synthesis is an area of great interest in Computer Graphics. In one step of this synthesis, an attempt is made to show to the fullest colours of all objects under study. To do this perfectly, one would have to keep track of all the details involved in interactions between light and matter. The colours of the objects can be described by their RGB coordinates or by their spectral curves. This paper makes a comparative analysis of both approaches in order to obtain a basis that would allow us to make an adequate evaluation and selection of a colour model.

## 1. Introdução

O estudo de técnicas que possibilitam a obtenção de imagens realistas é essencial para o desenvolvimento de muitas áreas como Simulação de Vôos, Medicina, Artes, Educação etc. Uma etapa fundamental do processo de obtenção de imagens realistas é a exibição fiel das cores de todos objetos em estudo.

O modelo de iluminação é um sistema matemático capaz de determinar a intensidade da luz, refletida ou transmitida por determinada superfície, que atinge um observador. Deve portanto possuir as informações necessárias para o cálculo da cor de cada pixel da tela. A cor pode ser descrita por sua localização em um espaço tri-dimensional; assim, o modelo de iluminação tem por objetivo determinar as três coordenadas, R (vermelho), G (verde) e B (azul), correspondentes às proporções dos fósforos que produzem a cor desejada.

Para se determinar a cor de um objeto, deve-se considerar as características das fontes luminosas e das superfícies do objeto a ser exibido. Um modelo de iluminação pode obter a cor de cada ponto de duas maneiras. Na primeira, o cálculo da cor é efetuado com base em suas coordenadas R, G e B, ou seja, através do modelo de cor RGB. Nesse método, além das três coordenadas é necessário o conhecimento de poucos parâmetros que determinam como o material reflete e transmite a luz. No outro modo, o cálculo da cor é feito com base em suas distribuições espectrais, isto é, usando o modelo Espectral de cor. O uso do modelo Espectral exige conhecimento das propriedades eletromagnéticas das fontes luminosas e dos materiais, como a curva de reflectância, o índice de refração etc. Quanto mais complexo o modelo de iluminação, mais dados são necessários.

No presente trabalho efetuaram-se algumas modificações no método clássico de "ray-tracing", de modo a possibilitar a incorporação de modelos de iluminação que utilizam o modelo de cor RGB e o Espectral, objetivando assim, através de análise e de experimentação, obterem-se subsídios que possibilitem avaliá-los e escolhê-los adequadamente para um sistema de síntese de imagens e animação.

## 2. Alguns Conceitos Básicos

*Estímulo de cor* é a energia radiante, de dada magnitude e composição espectral, que produz no olho humano a sensação de cor. Os estímulos cujas misturas provocam todos os demais estímulos são denominados *estímulos de cor primária* e, geralmente, correspondem às cores vermelha, verde e azul; as quantidades envolvidas na mistura são os *valores de triestímulos*. As razões entre cada valor do triestímulo e a soma dos três valores denominam-se *coordenadas de cromaticidade*; podem ser representadas visualmente no *diagrama de cromaticidade*. A linha que une as cores monocromáticas é denominada de "*spectrum locus*" [Wyszecki-Stiles (1982)].

Uma função "*colour-matching*" é a relação entre quantidade de triestímulo e comprimento de onda; é definida pela quantidade de estímulos monocromáticos necessários para formar cada comprimento de onda.

## 3. Sistemas de Cores

Uma cor pode ser descrita por sua localização em um espaço tri-dimensional de cor. Cada distribuição espectral de energia é associada a um ponto no espaço de cor e esse ponto é especificado por suas três coordenadas, ou seja, pelos seus valores de triestímulos [Wyszecki-Stiles (1982)].

Dois distribuições espectrais, associadas ao mesmo ponto no espaço, possuem os mesmos valores de triestímulos e provocam a mesma sensação de cor. Tais distribuições espectrais são chamadas de *metâmeras*.

### Triângulo de cores

Nesse sistema as cores são representadas por um triângulo equilátero, cujos vértices representam três estímulos primários: de baixo, médio e alto comprimento de onda. Os pontos compreendidos em cada lado do triângulo correspondem a todas as cores formadas pelas duas situadas nos respectivos vértices do lado; os pontos internos do triângulo representam as cores obtidas a partir da soma aditiva dos três estímulos primários [Stanley (1968)]. A figura 1 mostra um diagrama de cromaticidade para o triângulo de cores.

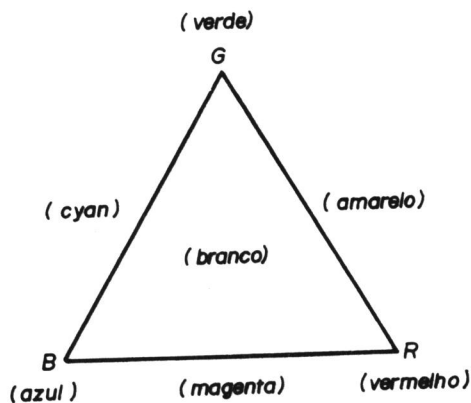


Figura 1: Triângulo de Cores.

Esse sistema apresenta um inconveniente: se os três estímulos forem monocromáticos, algumas cores formadas ficarão externas ao triângulo, sendo necessário acrescentar-se uma quantidade negativa do estímulo posicionado no vértice oposto ao lado interno à cor.

### Sistema C.I.E.

Para superar o problema de quantidades negativas de estímulos do triângulo de cores, a "Commission Internationale L'Eclairage", C.I.E., adotou o conceito de cores imaginárias: determina-se um conjunto de três estímulos X, Y e Z, correspondentes a novas cores primárias "imaginárias", de forma a circundar todo espectro visível. Essas cores imaginárias constituem uma abstração e formam novo padrão internacional de especificação de cor [Wiszecki-Stiles (1982)].

A figura 2 mostra um diagrama de cromaticidade C.I.E. e um triângulo de cores cujos vértices,

I, J e K, representam as três cores primárias: vermelha, verde e azul; os pontos internos ao triângulo correspondem a todas as cores formadas a partir da mistura aditiva de I, J e K. Como nenhum triângulo cujos vértices estejam na "spectrum locus" ou na área interna a ela pode ser traçado de modo a envolver toda a área do diagrama, conclui-se que, na realidade, não se pode obter todas as combinações possíveis a partir dessas cores primárias.

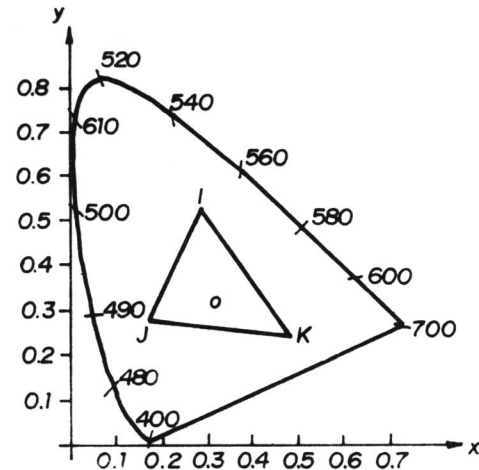


Figura 2: Diagrama de Cromaticidade C.I.E.

### 4. Modelos de Cores

Tem como objetivo permitir especificações convenientes dentro de uma faixa de cor. Para cada finalidade existe um modelo que melhor se adapta. Em aplicações de Computação Gráfica, são mais utilizados os modelos RGB e Espectral.

#### O Monitor RGB

Chama-se de *gamute* de um monitor a região do espaço de cor XYZ definida por um conjunto de distribuições espectrais produzidas pelos fósforos vermelho, verde e azul iluminados em diferentes proporções.

Os terminais RGB possuem um conjunto de três canhões que emitem feixes de elétrons. Os canhões são dispostos a incidir sobre a tela em pontos distintos, onde se encontram depositados três tipos de fósforos que quando atingidos por elétrons se sensibilizam de formas distintas, exibindo a cor vermelha ou verde ou azul. Os pontos tocados pelos feixes de elétrons ficam tão próximos entre si, que o olho humano só percebe um único ponto no monitor. A variação da aceleração de cada feixe produz várias

intensidades luminosas para cada fósforo, fornecendo assim inúmeros tons de cores.

**O Modelo RGB**

O modelo RGB é utilizado em televisões coloridas e em muitos vídeos de varredura. Baseando-se na teoria dos três estímulos [Young (1802)], que estabelece ser a retina humana constituída por três tipos de fotopigmentos, diferentes entre si pela sensibilidade relativa aos comprimentos de onda, o modelo utiliza um sistema de coordenadas cartesianas R, G e B, cujo subespaço de interesse é mostrado na figura 3.

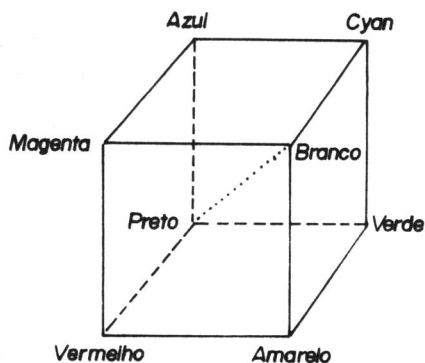


Figura 3: Cubo de Cor RGB.

O uso do modelo RGB em um modelo de iluminação simplifica muito o processo computacional, já que os dados de entrada estão no formato necessário para determinar as proporções dos fósforos que provocam a sensação de determinada cor.

**O Modelo Espectral**

Nesse modelo, o cálculo da cor é feito com base nas distribuições espectrais. A exibição correta da cor de um ponto de um objeto, especificada por sua curva espectral, tem por objetivo determinar as proporções dos fósforos que produzem uma distribuição de energia espectral que seja metâmera da distribuição da energia refletida naquele ponto.

O uso desse modelo torna o processo computacional bem mais complexo e caro; para aplicá-lo é necessário antes fazer uma amostragem da curva espectral contínua em valores discretos. No presente trabalho, a amostragem feita segue a metodologia proposta por Hall [Hall (1987)]: define-se um número de amostras e os intervalos de comprimento de onda de cada uma; o valor da curva amostrada em cada intervalo é uma média dos valores de toda a curva, medidos de 1 em 1 nm. no mesmo trecho.

Os cálculos envolvidos nos modelos de iluminação são executados com os valores amostrados e o resultado do modelo de iluminação é a curva espectral amostrada refletida por cada ponto do objeto;

essa curva amostrada deve ser reconstruída a fim de obter-se a distribuição espectral de energia da luz refletida. Uma vez reconstruída, multiplica-se a distribuição espectral refletida, em cada comprimento de onda, pelas funções “tristimulus matching - CIE”, obtendo-se um espectro resultante.

Em seguida, integra-se a curva resultante de modo a obterem-se os valores de triestímulos CIE.

Feito isso, deve-se converter os valores de triestímulos, por meio de uma multiplicação de matriz, em valores de luminância linear (dados de cromaticidade) RGB do conjunto de fósforos do monitor. Algumas cores podem exceder o gamute do monitor; quando isso ocorre, deve-se convertê-las para a faixa do gamute do monitor.

Finalmente, convertem-se as luminâncias lineares para as voltagens RGB, considerando-se a não linearidade do monitor.

**5. O Mecanismo de Iluminação**

Para exibir-se fielmente as cores de uma imagem no computador é fundamental descreverem-se, dentre outras coisas, as propriedades eletromagnéticas dos materiais (tipo de material: condutor ou dielétrico, coeficiente de refração, coeficiente de absorção etc.) e as fontes de luz (onde estão posicionadas, que intensidade possuem, para onde estão direcionadas e assim por diante). Essas informações são fornecidas pelo modelo de iluminação, um sistema matemático capaz de determinar a intensidade da luz, refletida ou transmitida por uma superfície, que atinge um observador. Para melhor compreender os modelos de iluminação, deve-se antes entender o mecanismo de iluminação.

Quando uma fonte ilumina uma superfície de separação entre dois meios, parte da luz incidente é devolvida (espalhada) ao primeiro meio e outra é transmitida (absorvida e refratada) ao segundo meio. O princípio da conservação de energia, formalizado na Eq. (1), estabelece que a energia incidente é igual a soma das energias retornada e transmitida [Hall (1989)].

$$\Phi_i = \Phi_{\text{espalhada}} + \Phi_{\text{transmitida}} \quad (1)$$

Para ser fisicamente consistente, um modelo de iluminação tem que respeitar esse princípio; ele deve também aproximar-se o mais possível da realidade, levando em consideração todas as componentes envolvidas no processo de iluminação: especular, difusa pura, mista, ambiental e relativa à emissividade da superfície. Assim, a intensidade que atinge um observador é dada por [Hall (1989)]:

$$I_v = \text{componente especular} + \\ \text{componente difusa} + \\ \text{componente mista} + \\ \text{componente ambiental} + \\ \text{componente emissiva} \quad (2)$$

### 5.1. Componente Especular

É a componente responsável pelos focos de luz ("highlights"), pontos de maior concentração de luz. O primeiro modelo a considerá-la foi o proposto por Phong [Phong (1975)]. Ela ocorre quando uma frente de onda incide em superfícies óticamente lisas, isto é, em superfícies cujas variações de altitude são pequenas quando comparadas com o comprimento de onda. Uma superfície óticamente lisa é um caso ideal; geralmente as superfícies apresentam alguma rugosidade. Assim, uma iluminação especular completa deve levar em consideração também os termos referentes às atenuações. A Eq. (3) mostra a expressão completa da componente especular [Hall(1989)].

$$I_v = r_\sigma G F_r I_r + t_\sigma G F_t \frac{n_v^2}{n_t^2} I_t \quad (3)$$

Onde

- $I_v$  → Intensidade que atinge o observador
- $I_r$  → Intensidade da onda refletida
- $I_t$  → Intensidade da onda transmitida
- $r_\sigma$  → Termo de atenuação para reflexão.
- $t_\sigma$  → Termo de atenuação para transmissão.
- $G$  → Função de atenuação geométrica.
- $F_r$  → Reflectância de Fresnel
- $F_t$  → Transmitância de Fresnel
- $n_v$  → Índice de refração do primeiro meio
- $n_t$  → Índice de refração do segundo meio

### Atenuação Geométrica

Objetos com superfícies rugosas são idealizados como sendo formados por inúmeras microfacetas, pequenos pedaços de superfícies. A função de atenuação geométrica,  $G$ , descreve a fração de microfacetas, orientadas de modo a refletir a luz de uma fonte para um observador, visíveis tanto à fonte como ao observador, isto é, a fração de microfacetas que não se encontram na sombra de outras. Neste trabalho, foi usada a seguinte fórmula, desenvolvida por Torrance e Sparrow [Torrance-Sparrow (1967)].

$$G = \min \left[ 1, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot V)}{(V \cdot H)}, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot L)}{(V \cdot H)} \right] \quad (4)$$

### As Relações de Fresnel

As relações de Fresnel fornecem o embasamento necessário para determinar os coeficientes  $F_r$ , reflectância de Fresnel, e  $F_t$ , Transmitância de Fresnel, que relacionam as energias refletidas e transmitidas com a incidente; elas dependem dos índices de refração dos meios,  $n_i$  e  $n_t$ , da polarização da luz incidente e do ângulo de incidência.

As razões entre as amplitudes das ondas refletida e incidente,  $r$ , para a luz polarizada paralela e perpendicular ao plano dos vetores  $\mathbf{N}$  e  $\mathbf{L}$ , na interface entre dois meios dielétricos - onde  $\mathbf{N}$  é a normal à superfície de separação e  $\mathbf{L}$  é o vetor de luz (vetor direcionado a partir do ponto de observação, na superfície, para a fonte de luz) - é dada por [Hall(1989)]:

$$r_{\parallel} = \frac{n_t (N \cdot L) + n_i (N \cdot T)}{n_t (N \cdot L) - n_i (N \cdot T)} \quad (5)$$

$$r_{\perp} = \frac{n_i (N \cdot L) + n_t (N \cdot T)}{n_i (N \cdot L) - n_t (N \cdot T)}$$

A energia transportada por uma onda é proporcional ao quadrado de sua amplitude. A reflectância de Fresnel, razão entre as energias refletida e incidente, é expressa em termos do quadrado de  $r$ . Como assume-se que a luz é circularmente polarizada, as interações podem ser caracterizadas como a média das componentes perpendicular e paralela da onda. A reflectância de Fresnel é dada por [Hall(1989)]:

$$F_r = \frac{1}{2} (r_{\parallel}^2 + r_{\perp}^2) = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} \quad (6)$$

Como consequência do princípio de conservação de energia, a transmitância de Fresnel é dada por:

$$F_t = 1.0 - F_r \quad (7)$$

Quando a luz se propaga por condutores, as relações de Fresnel se tornam mais complexas, pois as propriedades desses materiais derivam da existência de elétrons livres. Os condutores, por serem opacos, absorvem a luz; logo, seu coeficiente de absorção  $\mathbf{k}$  deve ser levado em conta. Quando  $n^2 + k^2 \gg 1$ , as relações de Fresnel podem ser aproximadas para:

$$r_{\parallel}^2 = \frac{(n_i^2 + k_i^2) (N \cdot L)^2 - 2n_t (N \cdot L) + 1}{(n_i^2 + k_i^2) (N \cdot L)^2 + 2n_t (N \cdot L) + 1} \quad (8)$$

$$r_{\perp}^2 = \frac{(n_i^2 + k_i^2) - 2n_t (N \cdot L) + (N \cdot L)^2}{(n_i^2 + k_i^2) + 2n_t (N \cdot L) + (N \cdot L)^2}$$

O índice de refração e o coeficiente de absorção variam com o comprimento da onda, mas seus valores experimentais são pouco conhecidos. Cook propôs um método para aproximar os dados inexistentes [Cook (1981)], método este adotado no presente trabalho.

**5.2. Componente Difusa Pura**

A componente difusa é a luz que emana de uma fonte de luz puntiforme, refletida e transmitida com igual intensidade em todas as direções, obedecendo a lei de Lambert [Hall (1989)]. Essa componente é expressa por:

$$I_v = R_d E_i + T_d E_i \tag{9}$$

Onde

- $I_v$  → Intensidade que atinge o observador
- $E_i$  → Densidade de Energia incidente
- $R_d$  → Reflectância direcional
- $T_d$  → Transmitância direcional

Os termos  $R_d$  e  $T_d$  fornecem a intensidade da luz refletida e transmitida em uma certa direção, em função da energia incidente em outra direção. No caso da componente difusa pura, esses termos independem do ângulo de visão (ângulo entre o observador e a normal à superfície). A Eq. (8) deve ser integrada sobre todo hemisfério de iluminação (hemisfério frontal) e todo hemisfério de transmissão (hemisfério posterior), adquirindo a forma:

$$I_v = R_d \int I_i \cos \theta_i dw_{frontal} + T_d \int I_i \cos \theta_i dw_{posterior} \tag{10}$$

**5.3. Componente Mista**

A iluminação mista, responsável pela maioria das iluminações de superfícies, ocorre quando a luz incide em uma superfície rugosa e é espalhada por todas as direções [Hall (1989)]. As intensidades da luz refletida e transmitida são dadas pela reflectância e transmitância bidirecional, que, nesse caso, dependem do ângulo de visão e da rugosidade da superfície. A componente mista é expressa por:

$$I_v = R_{bd} E_i + T_{bd} E_i \tag{11}$$

Onde

- $I_v$  → Intensidade que atinge o observador
- $E_i$  → Densidade de Energia incidente
- $R_{bd}$  → Reflectância bidirecional
- $T_{bd}$  → Transmitância bidirecional

A Eq. (10) quando integrada sobre todo hemisfério de iluminação e de transmissão, passa a ter a forma:

$$I_v = \int I_i R_{bd} \cos \theta_i dw_{frontal} + \int I_i T_{bd} \cos \theta_i dw_{posterior} \tag{12}$$

Uma superfície rugosa pode ser considerada como sendo formada por muitas microfacetas, cada uma delas sendo uma superfície ópticamente lisa; algumas microfacetas possuem normais em um ângulo  $d\omega_H$ , e refletem especularmente a luz que incide em um ângulo sólido  $d\omega_i$ ; para um ângulo sólido  $d\omega_r$  (figura 4). Somente a energia que incide nas microfacetas, cujas normais estão em  $d\omega_H$ , é refletida para o observador. Como algumas microfacetas podem mascarar e produzir sombras em outras, a atenuação geométrica deve ser considerada. Em Computação Gráfica, os cálculos são feitos com relação ao vetor de visão,  $V$ .

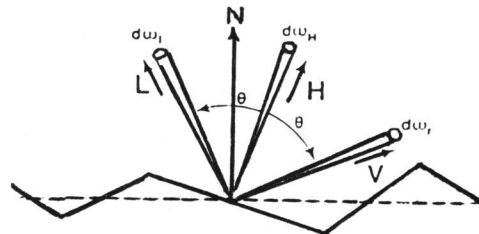


Figura 4: Geometria da Reflexão em uma Microfaceta.

Como já foi dito, os termos bidirecionais, nesse caso, dependem do ângulo de visão. Essa dependência é expressa por [Hall(1989)]:

$$R_{bd} = \frac{F_r}{\pi} \frac{D}{(N \cdot V) (N \cdot L)} G \tag{13}$$

Onde o termo  $D$  é a Distribuição de microfacetas. Esse termo fornece a quantidade de microfacetas orientadas paralelamente ao vetor  $H$  (vetor bissetor entre o vetor de luz,  $L$ , e o vetor de reflexão  $R$ ), e que



portanto refletem a luz especularmente. Os valores de  $\mathbf{D}$  dependem tanto do ângulo entre  $\mathbf{L}$  e  $\mathbf{H}$  como da rugosidade da superfície.

Existem várias funções para a distribuição de microfacetas. As adotadas neste trabalho foram as de Blinn [Phong (1975)] e de Beckmann [Beckmann-Spizzichino (1963)].

A função de Blinn é dada por:

$$D = (N \cdot H)^{Ns} \quad (14)$$

Onde  $Ns$  é a medida da rugosidade da superfície

Blinn percebeu que sua função possui um valor de pico igual a um sempre que  $\mathbf{H} = \mathbf{N}$ ; ela cai para metade de seu valor, em um ângulo entre  $\mathbf{H}$  e  $\mathbf{N}$  dado por  $\beta$ . Esse ângulo se relaciona com  $Ns$  através de:

$$Ns = - \frac{\ln(2)}{\ln(\cos \beta)} \quad (15)$$

A função de Beckmann é dada por:

$$\frac{1}{4\pi m^2 (N \cdot H_n)^4} \exp \left[ \frac{(N \cdot H_n)^2 - 1}{(N \cdot H_n)^2 m^2} \right] \quad (16)$$

Onde  $m$  é a inclinação média da superfície. Seu valor se relaciona com o ângulo  $\beta$ , usado por Blinn, através de:

$$m^2 = \frac{\tan^2 \beta}{\ln((\cos^4 \beta) / 2)} \quad (17)$$

#### 5.4. Componente Ambiental

A componente ambiental corresponde a qualquer iluminação não emitida diretamente por nenhuma fonte de luz, uniformemente incidente e igualmente refletida em todas as direções. Introduce-se então a reflectância hemisférica direcional,  $\mathbf{R}_{hd}$ , que é a integral da reflectância bidirecional, ou seja:

$$R_{hd} = R_a = \int_h R_{bd} (N \cdot L) dw_i \quad (18)$$

Assumindo-se uma iluminação uniforme e a luz refletida igualmente em todas direções, tem-se uma reflectância hemisférica direcional,  $\mathbf{R}_{hd}$ , igual à reflectância direcional hemisférica,  $\mathbf{R}_{dh}$ . Fazendo-se as substituições adequadas, obtém-se a intensidade que atinge o observador devido à componente ambiental:

$$I_{ra} = R_a I_{ia} \quad (19)$$

Onde

- $I_{ra} \rightarrow$  Iluminação ambiental refletida
- $I_{ia} \rightarrow$  Iluminação ambiental incidente

#### 5.5. Componente Emissiva

Quando uma superfície absorve muita energia, sua atividade molecular torna-se bem intensa e sua temperatura elevada; nessas condições, ela se comporta como uma fonte de luz, reemitindo ou reirradiando energia. Essa componente não foi considerada neste trabalho.

#### 6. Expressão Geral da Iluminação

A equação geral da iluminação é formada pelas componentes envolvidas no mecanismo de iluminação. É a base de todos modelos de iluminação usados em Computação Gráfica; sua forma geral é dada por [Hall(1989)]:

$$\begin{aligned} I_v = & r_\sigma G F_r I_r + t_\sigma G F_t \frac{n_v^2}{n_t^2} I_t + \\ & R_d \int I_i \cos \theta_i dw_{frontal} + \\ & T_d \int I_i \cos \theta_i dw_{posterior} + \\ & \int I_i R_{bd} \cos \theta_i dw_{frontal} + \\ & \int I_i T_{bd} \cos \theta_i dw_{posterior} + \\ & R_a I_{ia} + \\ & \text{componente emissiva} \end{aligned} \quad (20)$$

#### 7. Modelos de Iluminação

Os primeiros modelos consideravam poucos aspectos da Ótica, sem muito embasamento físico. A preocupação com a cor e outros detalhes surgiu com a evolução do hardware. Consequentemente, os modelos passaram a utilizar os fundamentos da Ótica juntamente com métodos de "ray-tracing".

Para implementar o modelo de cor RGB, escolheu-se o modelo de iluminação de Whitted [Whitted (1980)] e para o modelo de cor Espectral utilizou-se o de Cook & Torrance [Cook-Torrance (1982)]

**7.1. Modelo de Whitted**

Turner Whitted desenvolveu a técnica de “ray-tracing” juntamente com um modelo de iluminação, que trata os casos de objetos posicionados em uma região de sombra, computa a cor devido à reflexão em outras superfícies e considera a transparência de materiais [Whitted (1980)]. Esse modelo foi proposto para trabalhar com o modelo de cor RGB, mas ele pode ser estendido para o modelo de cor Espectral.

Um objeto está situado em uma região de sombra quando a luz de uma fonte é de alguma forma bloqueada; portanto, nas regiões de sombra, os materiais não são iluminados por aquela fonte luminosa.

A cor devido à reflexão em outros objetos deve ser levada em conta quando se tratar de uma superfície reflexiva. Nesse caso, o raio poderá incidir em outros corpos que, por sua vez, contribuirão para a cor da superfície em estudo.

Os materiais translúcidos pouco interagem com a luz; essa os atravessa e pode iluminar objetos que, na realidade, se encontram em sua sombra. Assim, a cor desses objetos também deve ser computada.

Normalmente, um raio luminoso, ao incidir sobre a superfície de um objeto, divide-se em três partes: uma correspondente ao raio refletido difusamente, outra ao raio refletido especularmente e a última ao raio transmitido (refratado). Da mesma forma, o raio que emana da superfície de um objeto é em geral obtido a partir da contribuição dessas três fontes. Isso significa que toda vez que um raio deixa algum objeto, três novos raios devem ser traçados; como a reflexão difusa na realidade gera uma infinidade de raios, apenas os refletidos na direção especular e os refratados são traçados. Somente objetos reflectivos necessitam de informações da direção especular; objetos transparentes requerem apenas informações da direção refratada.

Baseado nessa característica de propagação da luz, Whitted implementou seu método de “ray-tracing” junto com seu modelo de iluminação, de forma recursiva. O modelo de Whitted possui a seguinte forma:

$$I = I_a + K_d \sum_{n=1}^{I_s} (N \cdot L_n) I_n \quad (21)$$

$$+ K_s \sum_{n=1}^{I_s} (N \cdot H_n)^{N^s} I_n + K_t I_t$$

Onde

- I → Intensidade refletida
- I<sub>a</sub> → Intensidade da iluminação ambiental
- I<sub>n</sub> → Intensidade devido às fontes luminosas

- I<sub>t</sub> → Intensidade transmitida
- N → Normal à superfície
- L<sub>n</sub> → Vetor de luz da n-ésima fonte
- K<sub>d</sub> → Constante de reflexão difusa
- K<sub>s</sub> → Coeficiente da reflexão especular
- K<sub>t</sub> → Coeficiente de transmissão
- H<sub>n</sub> → Vetor H com relação a n-ésima fonte
- N<sub>s</sub> → coeficiente de rugosidade da superfície

No presente trabalho foi implementado o método clássico de “ray-tracing” desenvolvido por Whitted [Whitted(1980)]; o critério para finalizar o processo recursivo foi determinado empiricamente antes do início da computação da imagem, através de um número máximo de reflexões e refrações para cada raio (profundidade máxima). O modelo de cor usado no modelo de Whitted foi o RGB.

**7.2. O Modelo de Cook & Torrance**

Robert Cook e Keneth Torrance desenvolveram um modelo de iluminação [Cook & Torrance (1982)], no qual, ao invés de ser estudada a intensidade luminosa que incide sobre determinada superfície, é estudada a energia. Esse modelo trata de algumas características físicas dos materiais que só podem ser tratadas através do modelo de cor Espectral. Ele considera todos os aspectos óticos: distribuição de microfacetas, atenuação geométrica e a aproximação de Cook para obter a reflectância de Fresnel.

A forma geral do modelo de Cook & Torrance é:

$$I(\lambda) = R_a(\lambda) f I_a$$

$$+ d R_d(\lambda) \sum_{n=1}^{I_s} I_n(\lambda) (N \cdot L_n) dw_n \quad (22)$$

$$+ s \sum_{n=1}^{I_s} R_{bd}(\lambda) I_n (N \cdot L_n) dw_n$$

Onde

- I → Intensidade refletida
- I<sub>a</sub> → Intensidade da iluminação ambiental
- I<sub>n</sub> → Intensidade devido às fontes luminosas
- f → Fração do hemisfério iluminada
- R<sub>a</sub> → Reflectância hemisférica direcional
- R<sub>d</sub> → Reflectância direcional
- R<sub>bd</sub> → Reflectância bidirecional
- s → Percentagem de reflexão especular
- d → Percentagem de reflexão difusa

As percentagens de reflexão especular e difusa, propriedades do material, somam um. O fator de Fresnel, F<sub>r</sub>, implícito em R<sub>bd</sub>, é responsável pela dependência da componente especular com o comprimento de onda. Cook utilizou a distribuição

de microfaceta proposta por Beckmann, Eq. (15) [Beckmann-Spizzichino (1963)].

Para implementar-se o modelo de Cook & Torrance, foram feitas algumas alterações no método de "ray-tracing" de Whitted.

## 8. Análise de Resultados

### Comparação Visual

Para efeitos de comparação, duas imagens (geradas em uma Sparcstation 370 com placa de 24 bits) de uma mesma cena são apresentadas, isto é, mesmas fontes luminosas, mesmos objetos, mesmos

parâmetros de visualização e mesmas características de superfícies. A cena consiste de cinco esferas (vidro, cobre, ouro, prata e aço inoxidável) posicionadas sobre uma superfície quadriculada de um dielétrico imaginário. Uma das imagens foi computada com o modelo de iluminação de Whitted, que usa o modelo de cor RGB, a outra com o modelo de iluminação de Cook & Torrance, consequentemente com o modelo de cor Espectral.

A figura 5 mostra as imagens geradas: a superior obtida com o modelo RGB e a inferior com o modelo Espectral [Ferreira (1991)].

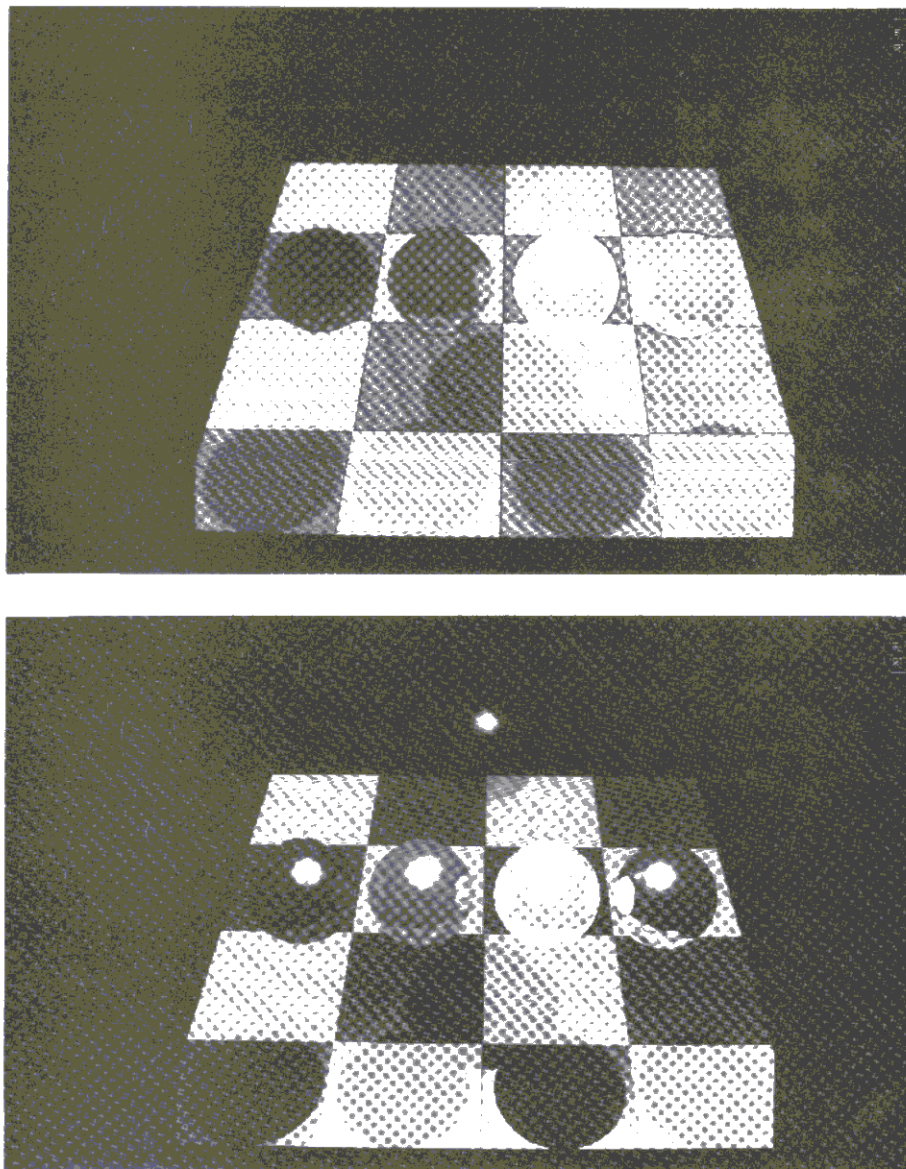


Figura 5: Imagens Geradas com o Modelo de Cor RGB e o Modelo de Cor Espectral.



Em termos de qualidade da imagem, a diferença entre ambas é bem nítida. A exibição de uma cor no vídeo a partir de sua curva espectral produz imagens bem mais realistas. A análise detalhada das figuras permite observar que a imagem utilizando o modelo de Whitted (modelo de cor RGB) não é tão fiel à realidade quanto parece à primeira vista: materiais dielétricos, como a superfície quadriculada e a esfera de vidro, não mostram o "highlight" esperado, apesar da transparência ser bem evidente. Da mesma forma, as imagens dos condutores, como as esferas metálicas, não provocam sensação tão real quanto a causada pelo modelo Espectral. Nota-se também, nesses mesmos materiais, diferença no que diz respeito à cor, devido à reflexão em outros objetos. No modelo RGB, o reflexo da superfície quadriculada é intenso demais, chegando até a dar uma impressão de outro objeto e não de um reflexo; essa peculiaridade é bem mais acentuada na esfera de aço inoxidável.

### Tempo de Processamento

Uma boa comparação não pode ser apenas visual. O tempo de processamento de cada modelo não pode ser esquecido. O "ray-tracing" é um método de elevado custo computacional e a incorporação de modelos complexos aumenta esse custo de modo significativo.

O conhecimento do tempo gasto para gerar uma imagem é fundamental; só assim pode-se avaliar em que situações modelos complexos, portanto computacionalmente caros, são justificados. O modelo RGB consumiu 17.5 minutos, enquanto o Espectral 45.2 minutos. Trata-se de uma diferença muito grande. É essencial, portanto, ter subsídios que permitam uma decisão correta de quando fazer uso do modelo de cor RGB ou Espectral.

### 9. Conclusões

Os modelos de iluminação, que fazem uso de modelo de cor Espectral, requerem muitos dados que nem sempre estão disponíveis na literatura. Existem materiais, com valores de seus parâmetros desconhecidos, que só podem ser obtidos empiricamente. Mas mesmo obtidos dessa forma, geram imagens de alta qualidade.

Os modelos que trabalham com curva Espectral incorporam muitos aspectos óticos, fornecendo assim mais subsídios para obtenção de imagens realistas. Em termos de qualidade de imagem, não resta dúvida de que o modelo Espectral é mais adequado. O custo computacional devido a seu tempo de processamento, mesmo para uma imagem simples como a apresentada no presente trabalho, é muito

elevado. É necessário conhecer-se a natureza dos objetos presentes na cena para avaliar se seu uso é de fato justificável.

Alguns aspectos ainda precisam ser melhor investigados; trabalhos futuros devem ser desenvolvidos. Uma sugestão é o estudo de melhor tratamento da cor, provocada pela presença de outros objetos na cena: como pode ser observado na esfera de prata e aço inoxidável da figura 5., a cor muitas vezes não é tão realista, provavelmente por estar situada fora do gamute do monitor.

As alterações efetuadas no método de "ray-tracing" podem facilmente ser incluídas em um ambiente de síntese de imagens de alta performance.

### 10. Referências

- Beckmann, P. and Spizzichino, A., *The Scattering of Eletromagnetic Waves from Rough Surfaces*, Pergamon Press, Oxford, England 1963.
- Cook, R. L., *A Reflectance Model for Realistic Image Synthesis*, Master Thesis, Cornell University, Ythaca, N.Y. 1981.
- Cook, R. L. and Torrance, K. E., *A Reflectance Model for Computer Graphics*, *Communications of the ACM* 1 (1982) number 1.
- Ferreira, S. B. L., *Modelos de Iluminação: um Estudo Comparativo*, Tese de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica, R.J. 1991.
- Hall, R. A., *Color reproduction and Illumination Models*, *Techniques for Computer Graphics* 1987.
- Hall, R. A., *Illumination and Color in Computer Generated Imagery*, Springer-Verlag 1989.
- Phong, B. T., *Illumination for Computer Generated Pictures*, *Communications of the ACM* 18 (1975) number 6.
- Stanley, R. C., *Light and Sound for Engineers*, Thomas Nelson and Sons 1968.
- Torrance, K. E. and Sparrow, E. M., *Theory for Off-Specular Reflection from Roughened Surfaces*, *Journal of the Optical Society of America* 57 (1967) number 9.
- Whitted, T., *An Improved Illumination Model for Shaded Display*, *Communications of the ACM* 23 (1980) number 6.
- Wysocki, G. and Stiles, W. S., *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, John Wiley & Sons 1982.
- Young, T., *On the Theory of Light and Colors*, *London Phil. Trans. Royal Soc.* 1802.

Imagens a cores do artigo *Modelos de Cor: Espectral ou RGB*, por Simone Bacellar Leal Ferreira

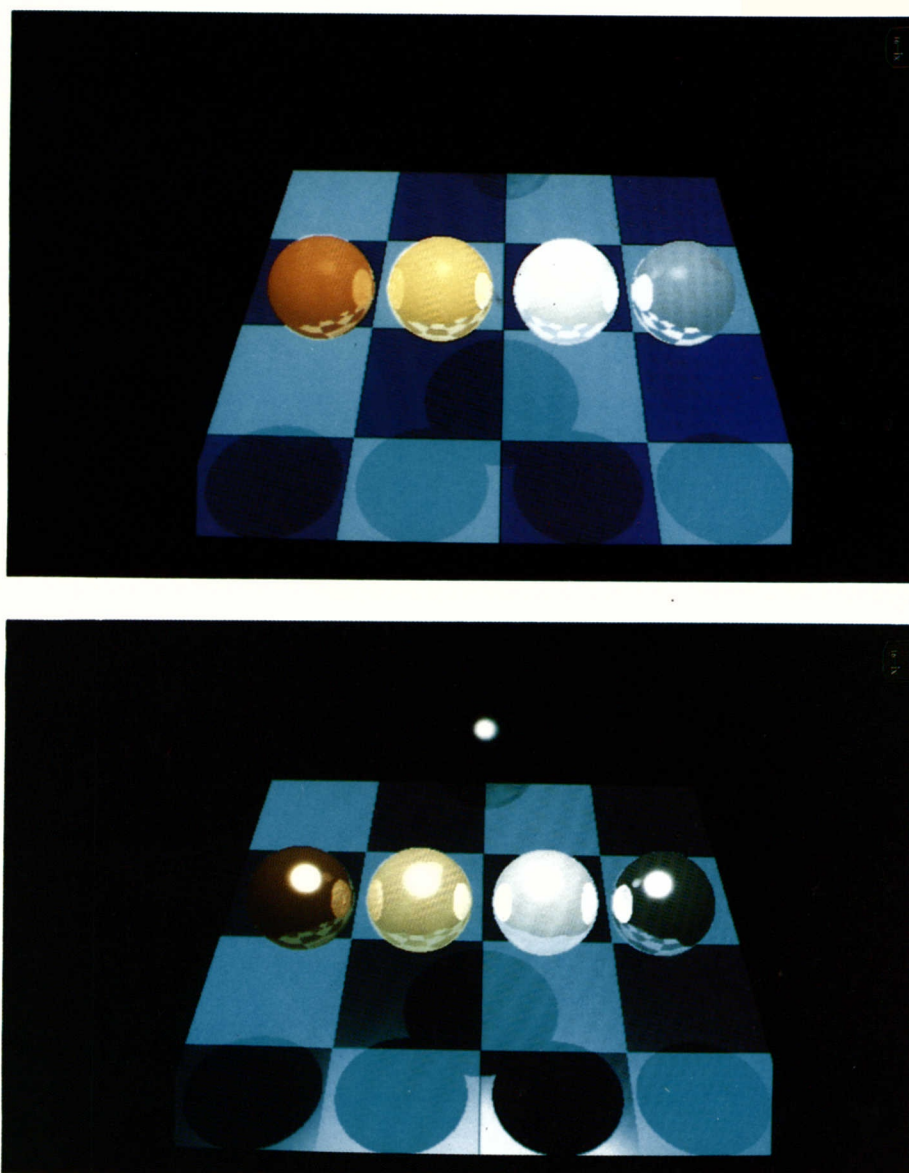


Figura 5: Imagens Geradas com o Modelo de Cor RGB e o Modelo de Cor Espectral.