



Cor



Márcio Bueno
{cgtarde,cgnoite}@marciobueno.com)

Fonte: Material do Prof. Claudio Esperança
e do Prof. Paulo Roma Cavalcanti

Cor

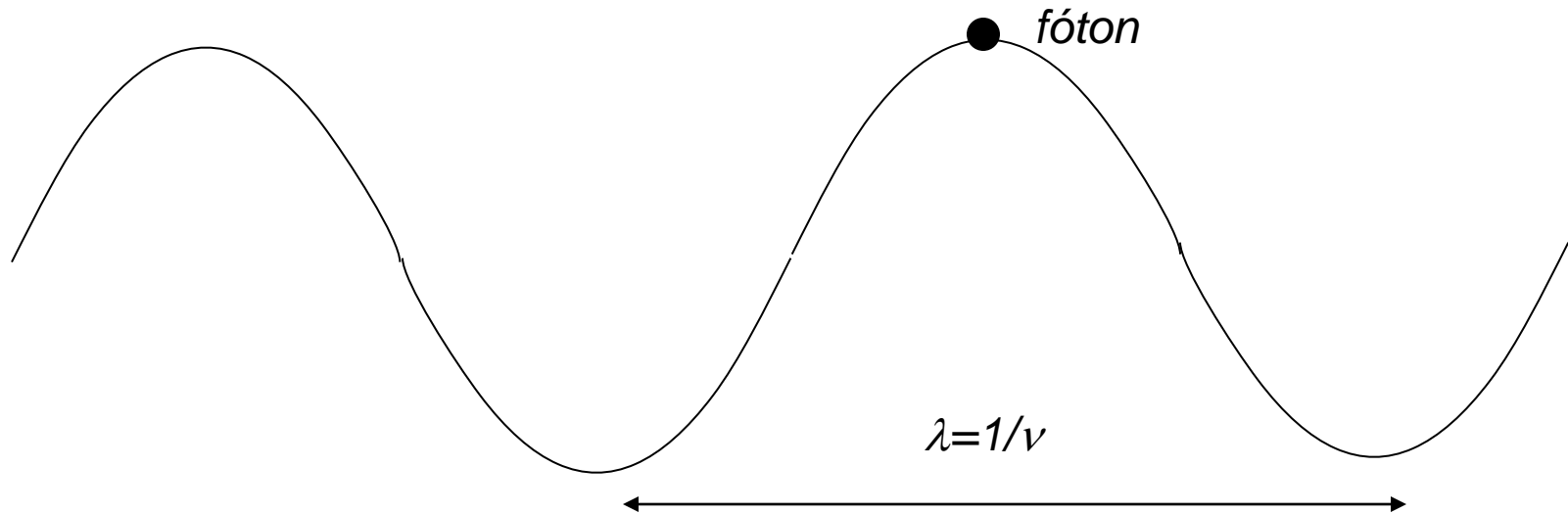
- ▶ O que é cor?
 - ▶ Cor é uma **sensação** produzida no nosso cérebro pela luz que chega aos nossos olhos.
 - ▶ É um problema psico-físico.

Paradigmas de Abstração

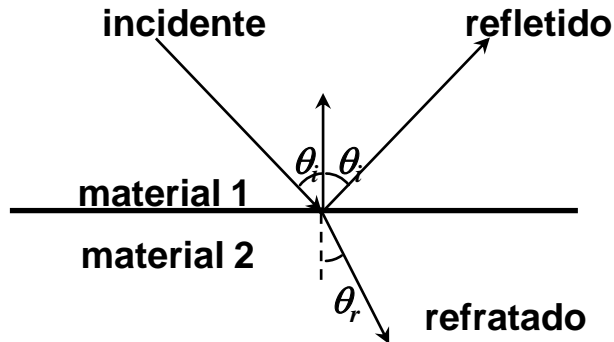
- ▶ Universos: físico → matemático → representação → codificação.
- ▶ Luz → modelo espectral → representação tricromática → sistemas de cor.

Modelo Espectral de Cor

- ▶ Luz é uma **radiação** eletro-magnética que se propaga a 3×10^8 km/s ($E = h \cdot \nu$, $c = \lambda \cdot \nu$).
 - ▶ h é a constante de Planck (6.626×10^{-34} J · s).
- ▶ Luz branca é uma mistura de radiações com diferentes comprimentos de onda.



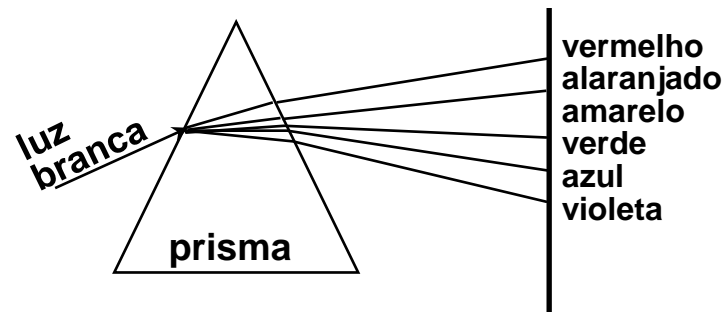
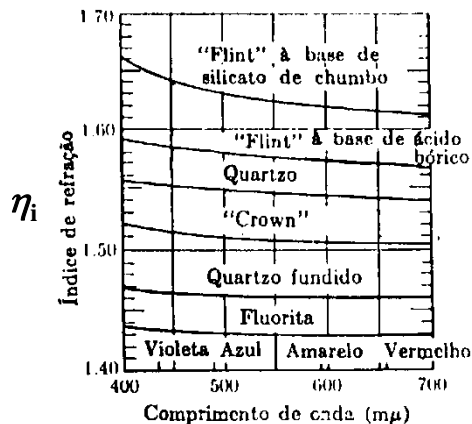
Reflexão e Refração



$$\text{sen } \theta_r = \frac{\eta_2}{\eta_1} \text{ sen } \theta_i$$

*lei de Snell
(1621)*

$$\eta_i = \frac{\text{velocidade da luz no vácuo}}{\text{velocidade da luz no material } i}$$



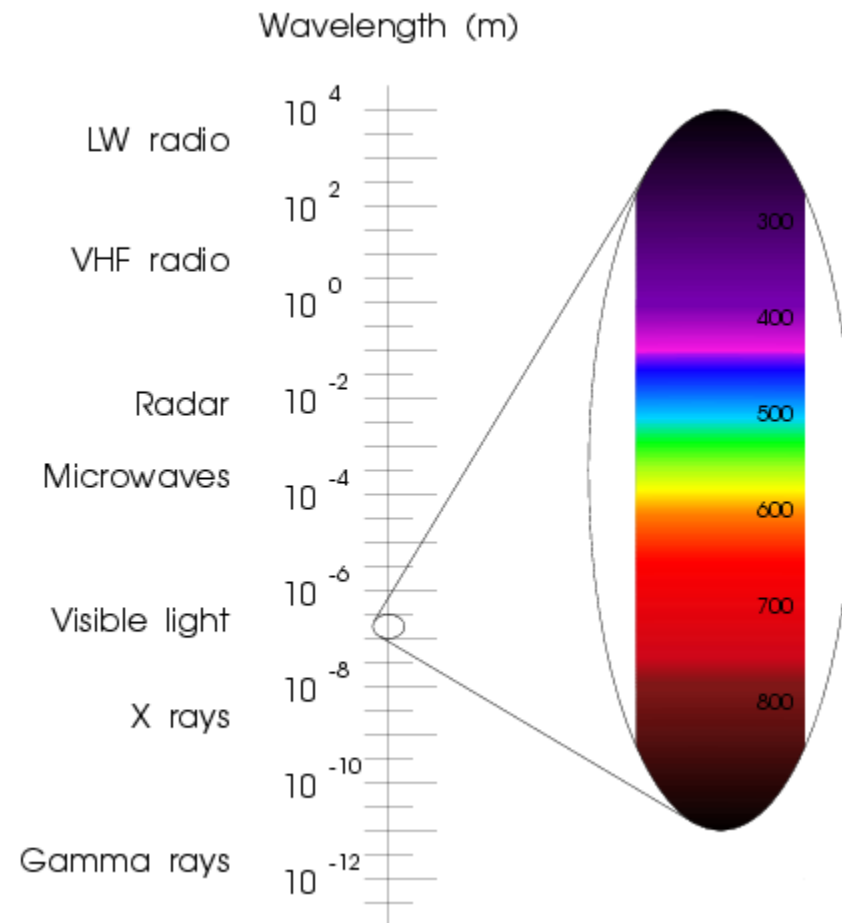
luz branca (acromática) tem todos os comprimentos de onda

Modelo Matemático de Cor

- ▶ Universo matemático é o conjunto **D** de todas as funções de distribuição espectral.
- ▶ Função de **distribuição espectral** relaciona: comprimento de onda com uma grandeza radiométrica.

$$D = \left\{ f : U \subset \mathfrak{R}^+ \rightarrow \mathfrak{R}^+ \right\}$$

Espectro Visível

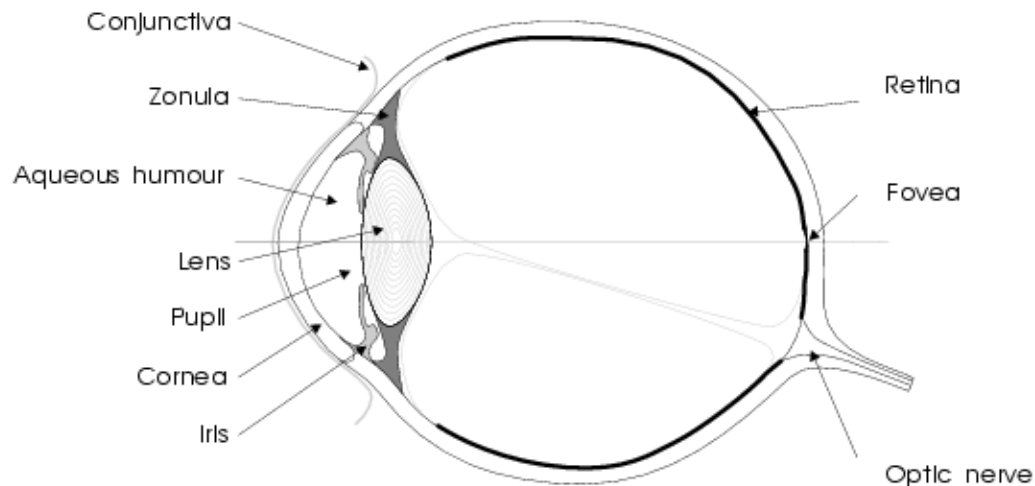


Luz Visível

Range (nm)	Colour
380 – 450	Violet
450 – 490	Blue
490 – 560	Green
560 – 590	Yellow
590 – 640	Orange
640 – 730	Red

Sistemas Físicos de Cor

- ▶ O olho é um sistema físico de processamento de cor (sistema refletivo).
 - ▶ Similar a uma câmera de vídeo.
 - ▶ Converte luz em impulsos nervosos.



Percepção de Cor

- ▶ Diferente para cada espécie animal.
- ▶ Dentre os mamíferos, só o homem e o macaco enxergam cores.
- ▶ Aves têm uma visão muito mais acurada do que a nossa.

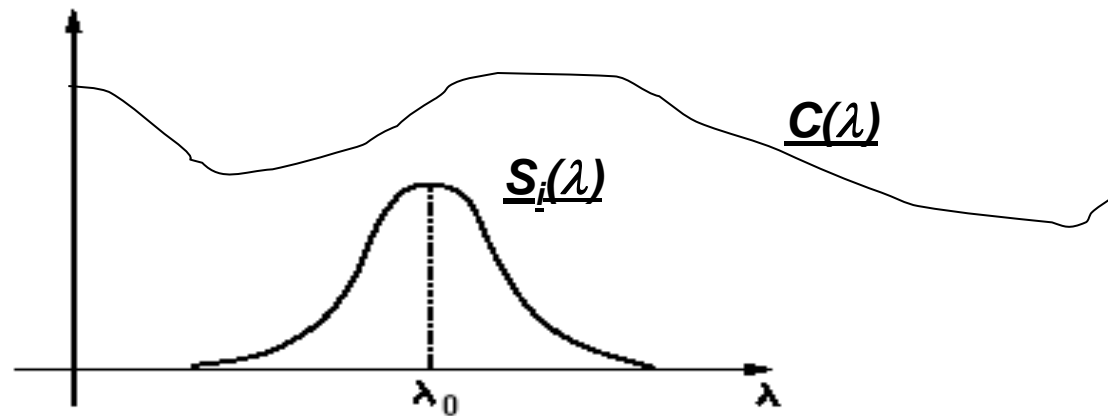
Representação

- ▶ Amostragem gera uma representação **finita** de uma função de distribuição espectral.
- ▶ Todo sistema refletivo possui um número **finito** de sensores, que fazem uma amostragem em n faixas do espectro.

Amostragem

$$C(\lambda) \rightarrow (c_1, c_2, \dots, c_n), c_i = \int_0^\infty C(\lambda) s_i(\lambda) d\lambda$$

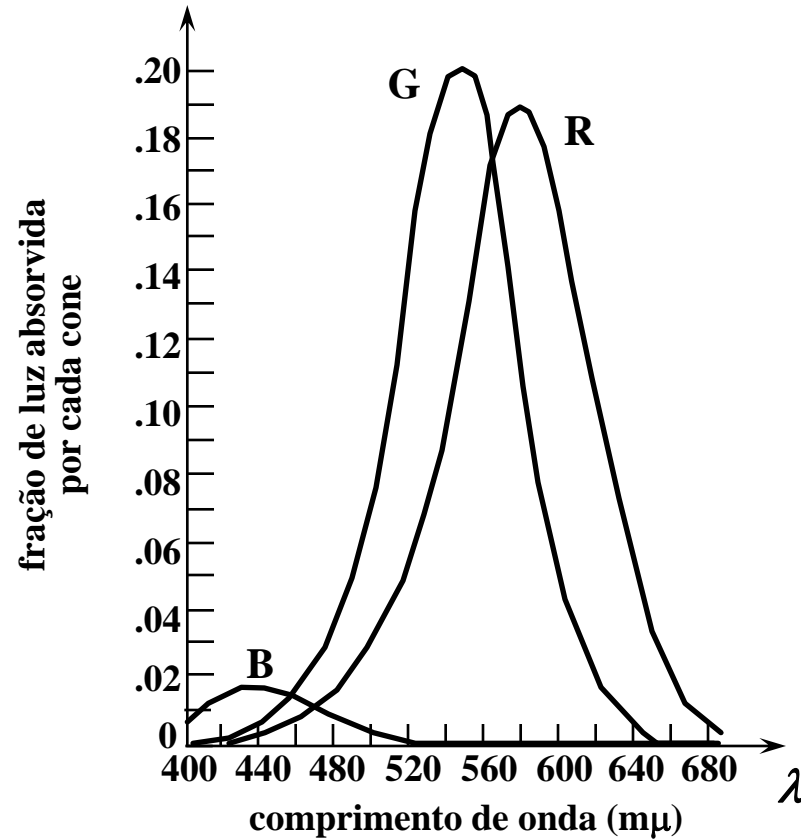
- ▶ $s_i(\lambda)$ é a função de resposta espectral do i -ésimo sensor.



Sistema Visual Humano

- ▶ Dois tipos de células receptoras com sensibilidades diferentes: cones e bastonetes.
 - ▶ Bastonetes → luz de baixa intensidade (sem cor).
 - ▶ Cones → luz de média e alta intensidade (com cor).
- ▶ Três tipos de cones que amostram: comprimento de onda curto (azul), médio (verde) e longo (vermelho).

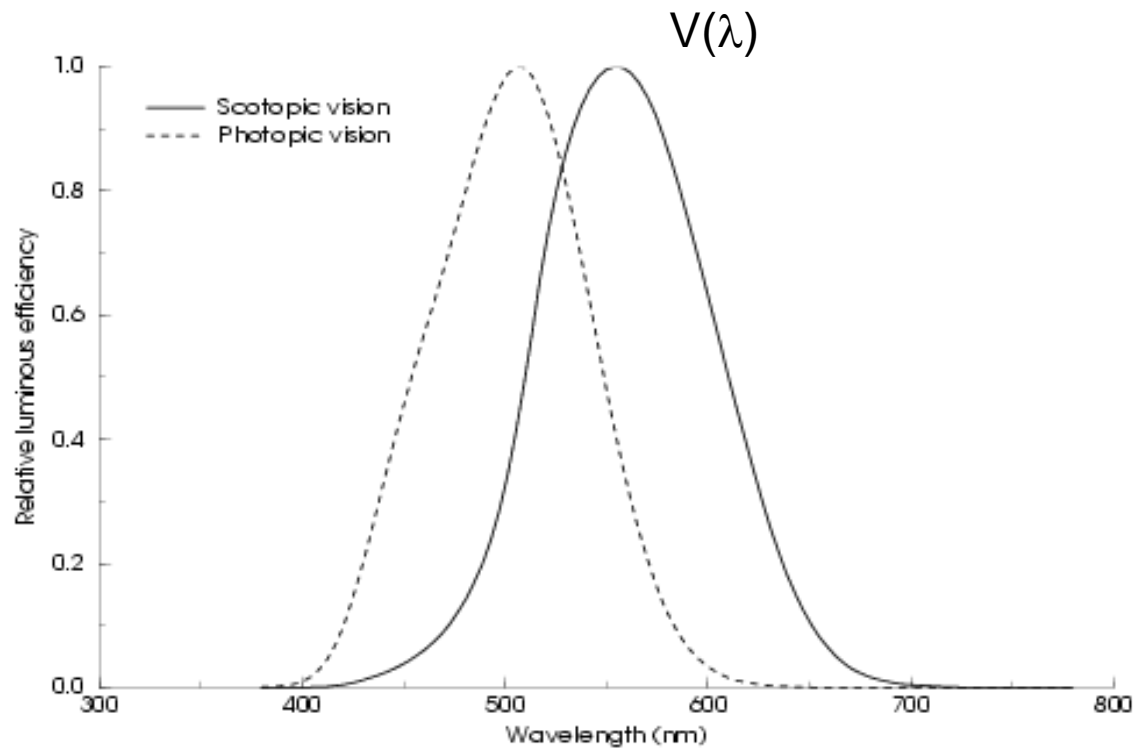
Tipos de Cones



Eficiência Luminosa

- ▶ Brilho aparente varia com o comprimento de onda.
- ▶ Pico do brilho é diferente para níveis baixos (bastonetes), médios e altos (cones).
 - ▶ Máximo na faixa do verde.

Eficiência Luminosa Relativa

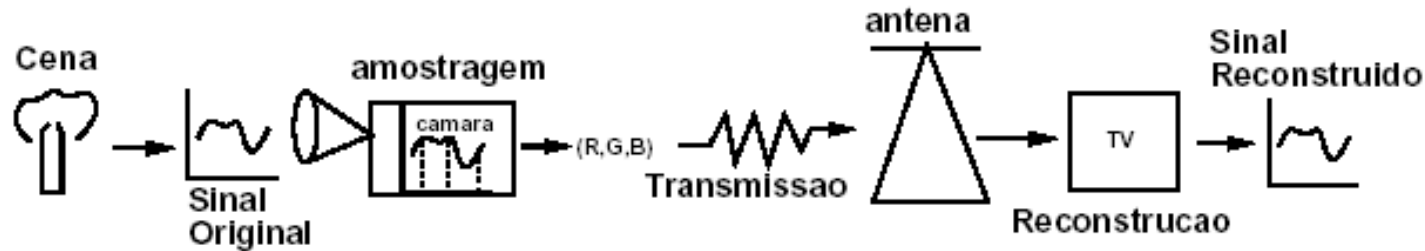


Sistemas Emissivos

- ▶ Sistemas **emissivos** reconstroem cores a partir de emissores que formam uma base de primárias, P_k

$$C_r(\lambda) = \sum_{k=1}^n c_k P_k(\lambda).$$

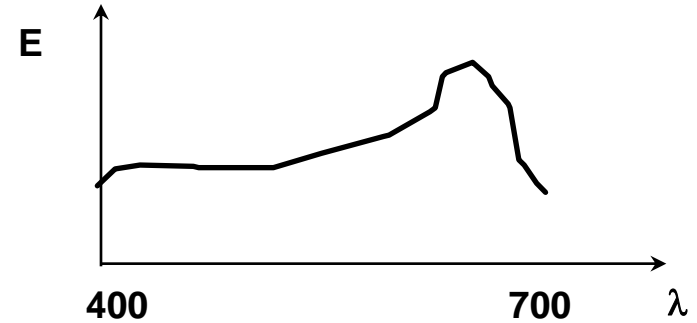
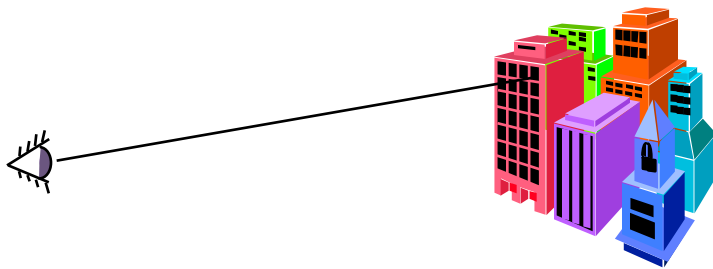
Amostragem e Reconstrução



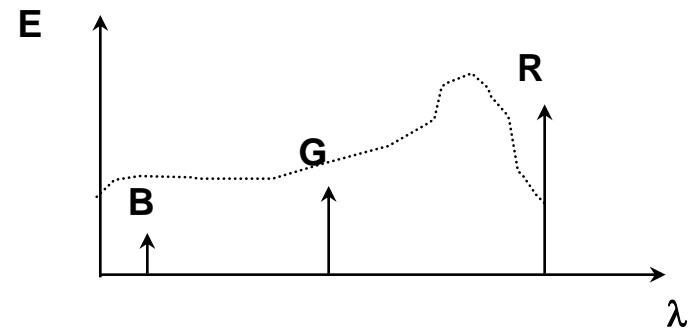
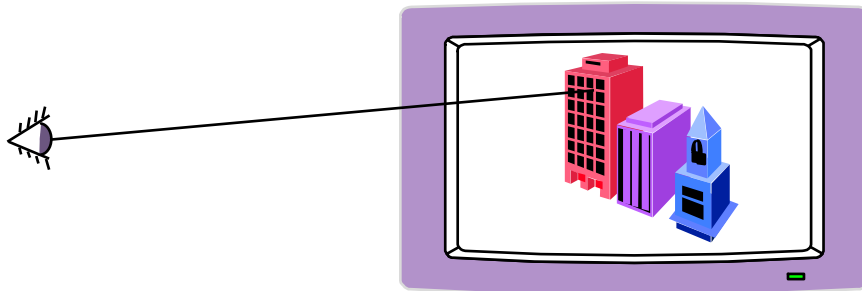
- ▶ A cor reconstruída deve ser perceptualmente igual a cor original.
 - ▶ É possível devido ao **metamerismo**.
 - ▶ Cores metaméricas são perceptualmente idênticas.

O Problema De Reprodução De Cor Em CG

Mundo Real



Espaço Virtual



- mesma sensação de cor \Rightarrow Metamerismo
 - só distingue 400 mil cores ($< 2^{19}$) \Rightarrow 19 bits deveriam ser suficientes
-

Representação Discreta de Cor

- ▶ O espaço de todas as distribuições espectrais possui dimensão **infinita**.
- ▶ Representação **finita** requer um processo de amostragem.
 - ▶ Aproxima um espaço de dimensão infinita por um espaço de dimensão finita (há perda de informação).
- ▶ Pode-se utilizar um vetor de dimensão finita na representação discreta de cor.

$$R: f \in D \rightarrow (f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)) \in \mathfrak{R}^n$$

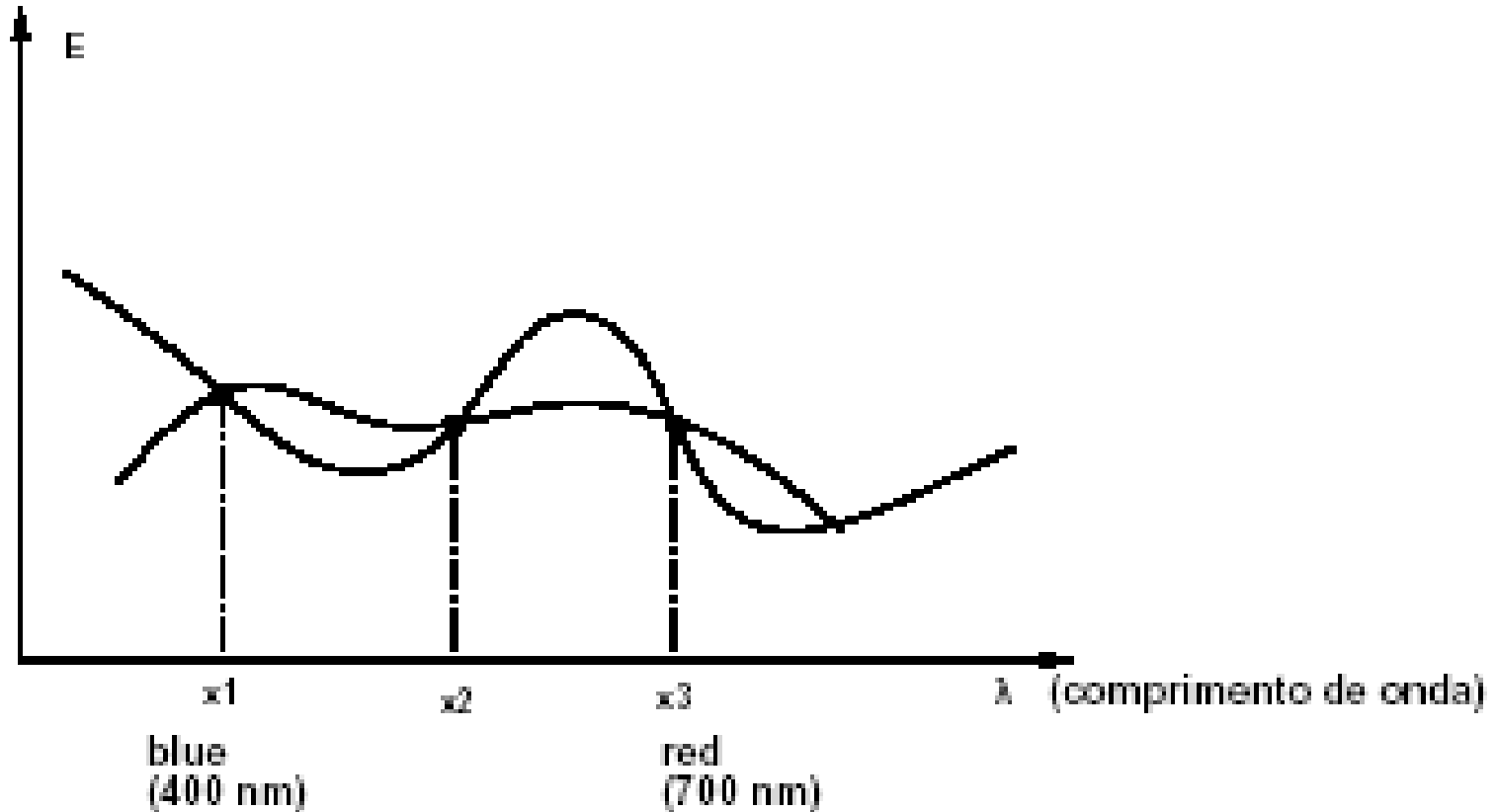
Espaço Perceptual de Cor

- ▶ Representação define uma transformação linear.
 - ▶ De acordo com os experimentos de Young em 1807.

$$R(af_1 + bf_2) = aR(f_1) + bR(f_2)$$

- ▶ Espaço perceptual de cor é de dimensão 3.
- ▶ Representação discreta associa um conjunto de distribuições espectrais ao mesmo ponto do \mathbf{R}^3 (metamerismo).

Metamerismo



Reconstrução de Cor

- ▶ **Dados**
 - ▶ Uma função de distribuição espectral $\mathbf{C}(\lambda)$,
 - ▶ Um sistema emissivo com base \mathbf{P}_k
 - ▶ E um sistema refletivo,
- ▶ Como calcular as componentes na base de primárias de forma a que a cor reconstruída seja perceptualmente equivalente a cor original?

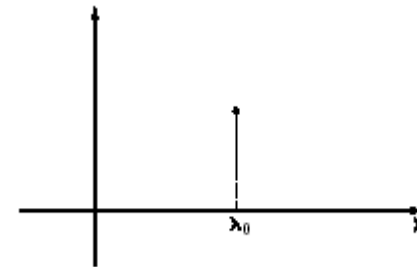
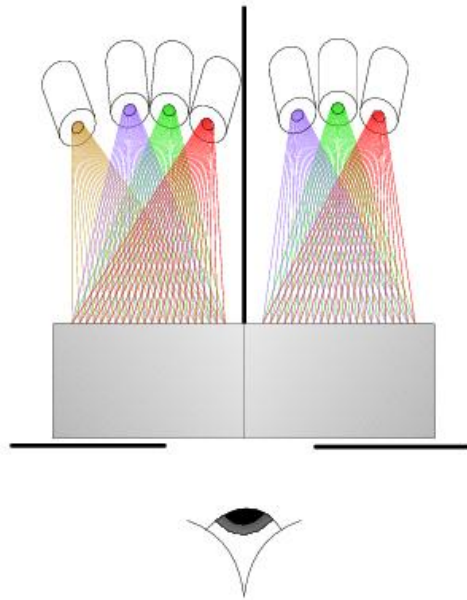
Funções de Reconstrução de Cor

- ▶ Uma vez que se conheça a resposta espectral do sistema, prova-se que:

$$C_r(\lambda) = \sum_{k=1}^n c_k P_k(\lambda), c_k = \int_0^{\infty} C(\lambda) r_k(\lambda) d\lambda$$

$r_k(\lambda)$ são as funções de reconstrução de cor.

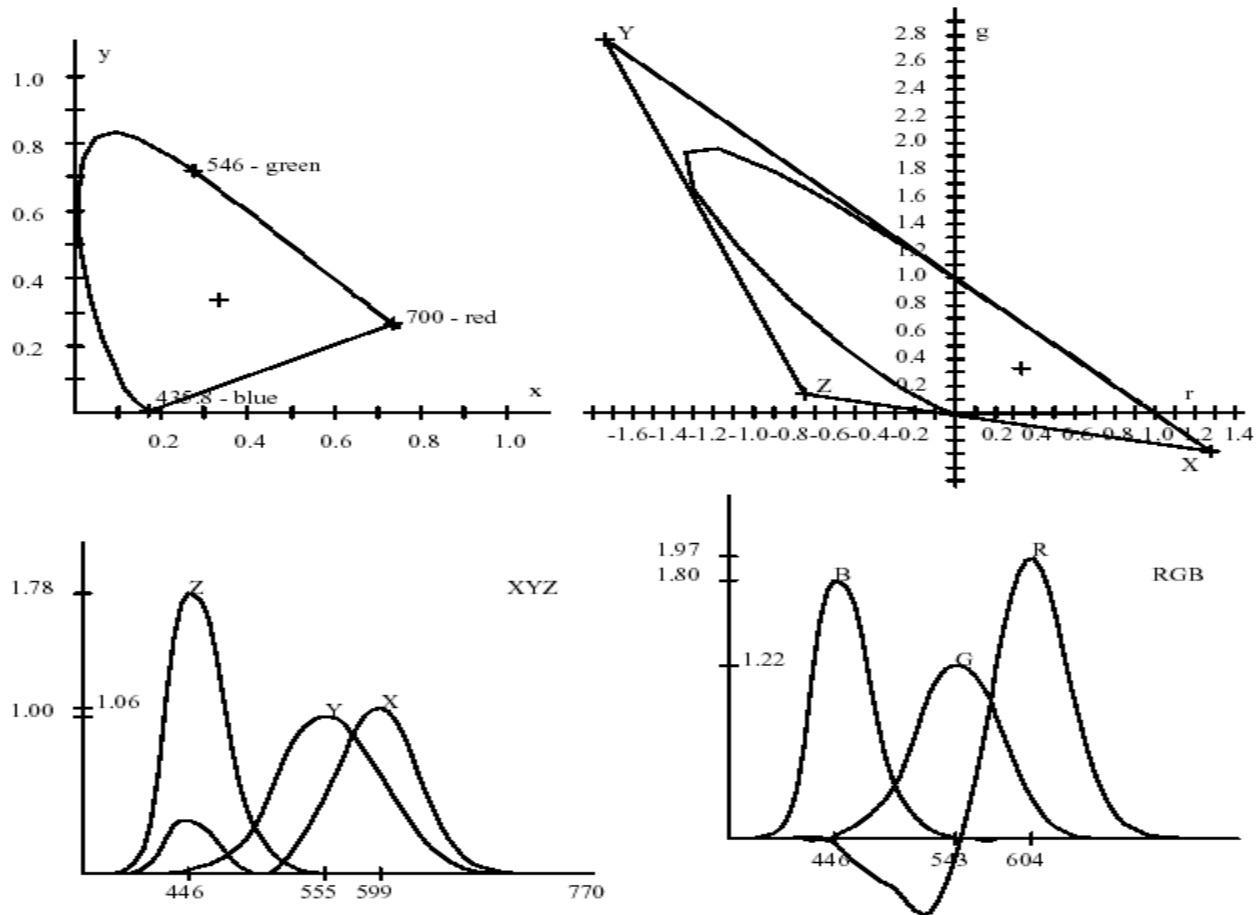
Resposta Espectral



cor espectral

- ▶ Cor espectral desconhecida à esquerda.
- ▶ Três cores padrão de cada lado.
- ▶ Intensidade de cada cor padrão varia de forma independente.

Diagrama de Cromaticidade



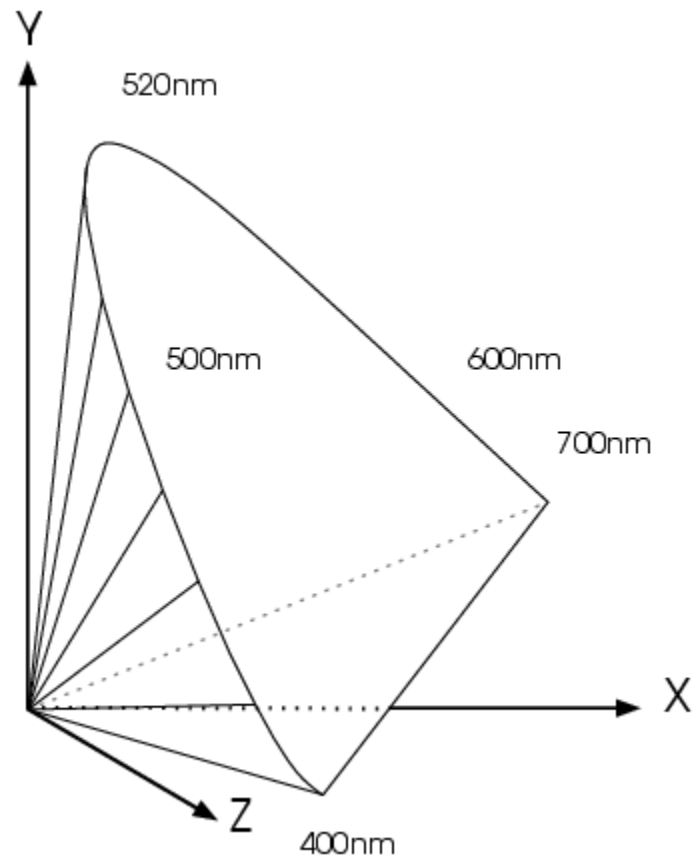
Intensidade Negativa?

- ▶ Podem haver cores que não são igualadas pelas três cores padrão apenas.
 - ▶ Nesse caso, adiciona-se uma cor padrão ao lado esquerdo também (correspondendo, matematicamente, a uma intensidade negativa).

Sólido de Cor

- ▶ Conjunto de todas as cores visíveis forma um cone convexo, chamado de sólido de cor.
 - ▶ Combinação convexa de duas distribuições espectrais é uma distribuição espectral.
 - ▶ Cada distribuição espectral corresponde a um único ponto no espaço de cor.
 - ▶ Aplicação de representação é linear.
 - ▶ Espaço de cor é o conjunto das retas que passam pela origem.

Sólido de Cor



Propriedades

- ▶ $C(\lambda)$ é cor visível $\Rightarrow t C(\lambda)$ é cor visível.
 - ▶ $R(t C(\lambda)) = t R(C(\lambda))$.
- ▶ $C_1(\lambda)$ e $C_2(\lambda)$ são cores visíveis $\Rightarrow (1-t) C_1(\lambda) + t C_2(\lambda)$, $t \in [0, 1]$, é cor visível.
 - ▶ $R((1-t) C_1(\lambda) + t C_2(\lambda)) = (1-t) R(C_1(\lambda)) + t R(C_2(\lambda))$.

Diagrama de Cromaticidade

- ▶ Projeta-se radialmente o sólido de cor no plano de Maxwell: $x + y + z = 1$.
 - ▶ A interseção do sólido de cor com o plano de Maxwell é uma curva convexa.
 - ▶ Cores espectrais correspondem a pontos na fronteira do diagrama de cromaticidade.

Coordenadas de Cromaticidade

- ▶ Reta que passa pela origem e por uma cor \mathbf{C} .
 - ▶ $\{p; p = t\mathbf{C}, t \in R\}$.
- ▶ Projeção $c = (c_r, c_g, c_b)$ no plano de Maxwell impõem $c_r + c_g + c_b = 1$.
- ▶ $t(C_r + C_g + C_b) = c_r + c_g + c_b = 1 \Rightarrow t = 1/(C_r + C_g + C_b)$
 $\Rightarrow c_i = C_i/(C_r + C_g + C_b)$.

Luminância

- ▶ Dada uma luz monocromática com potência constante de 1 W , como varia a resposta do olho a este estímulo, em função do comprimento de onda?
 - ▶ A resposta é máxima para $\lambda = 555\text{ nm}$ (verde).
- ▶ Luz monocromática com $\lambda = 555\text{ nm}$ e 1 W de potência produz 680 lumens.
- ▶ A constante $K(\lambda) = 680 V(\lambda)\text{ lm/W}$ permite converter de watts para lumens.

Cálculo da Luminância

- ▶ Luminância é uma grandeza colorimétrica que corresponde aos termos perceptuais de **brilho** (emissores) ou **luminosidade** (refletores).
- ▶ Luminância é uma função linear.

$$L: \zeta = \mathfrak{R}^3 \rightarrow \mathfrak{R}$$

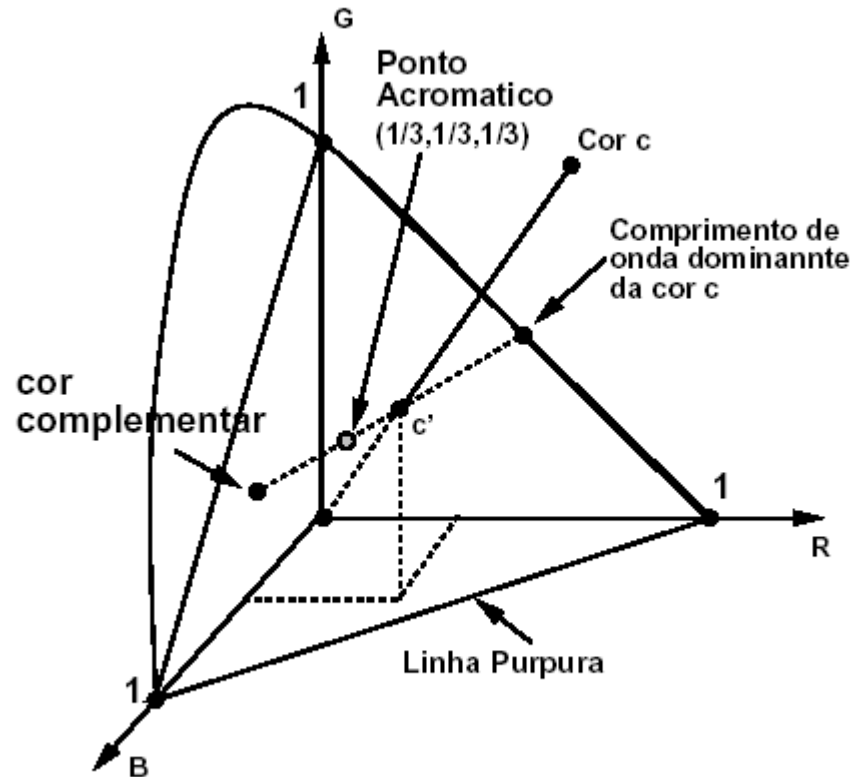
$$L(C(\lambda)) = K(\lambda) \int_0^{\infty} C(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

$$L(C(\lambda)) = \langle L, c \rangle = \langle (0.177, 0.812, 0.016), (c_r, c_g, c_b) \rangle$$

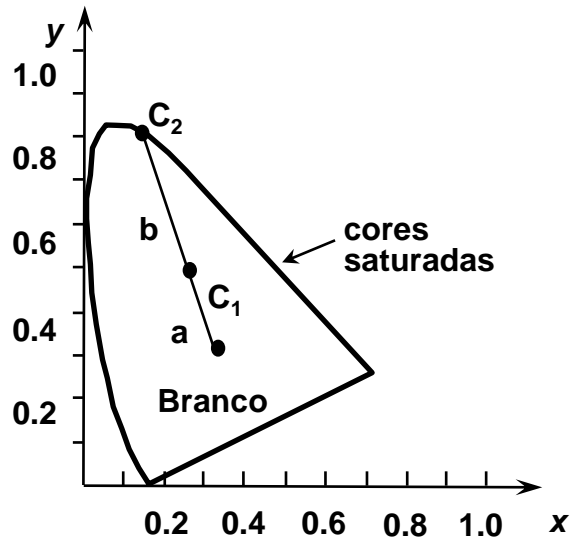
Decomposição Crominância-Luminância

- ▶ Coordenadas de cromaticidade captam a noção da **matiz** de uma cor.
- ▶ Juntamente com a informação de intensidade ou luminância determinam unicamente uma cor.

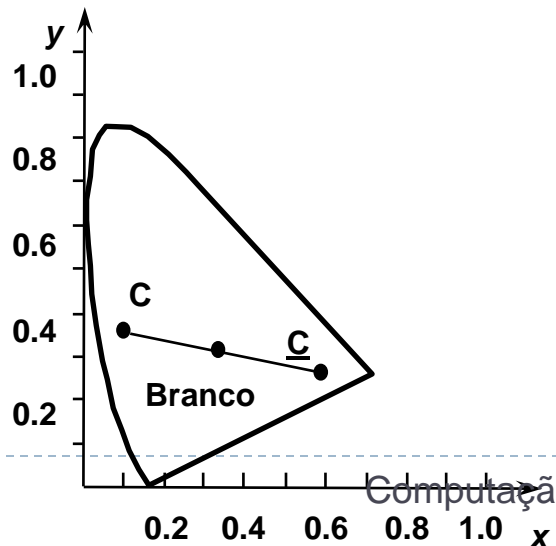
Cor Dominante e Complementar



Saturação e Cor Complementar no Diagrama de Cromaticidade xy



$$\text{saturação de } C_1 = \frac{a}{a + b}$$

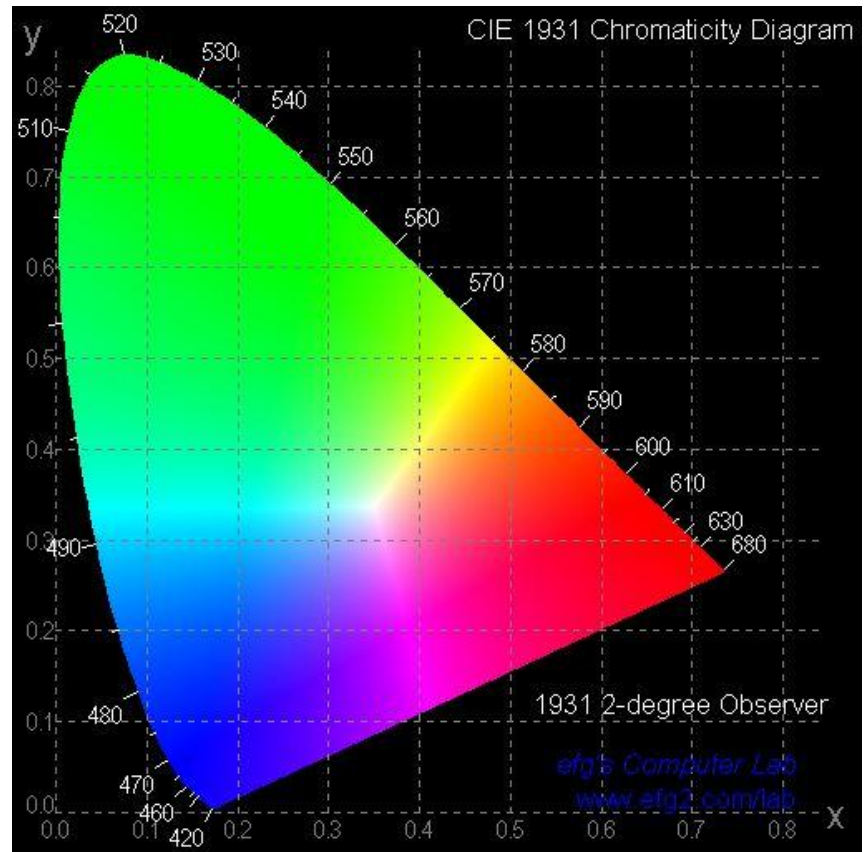
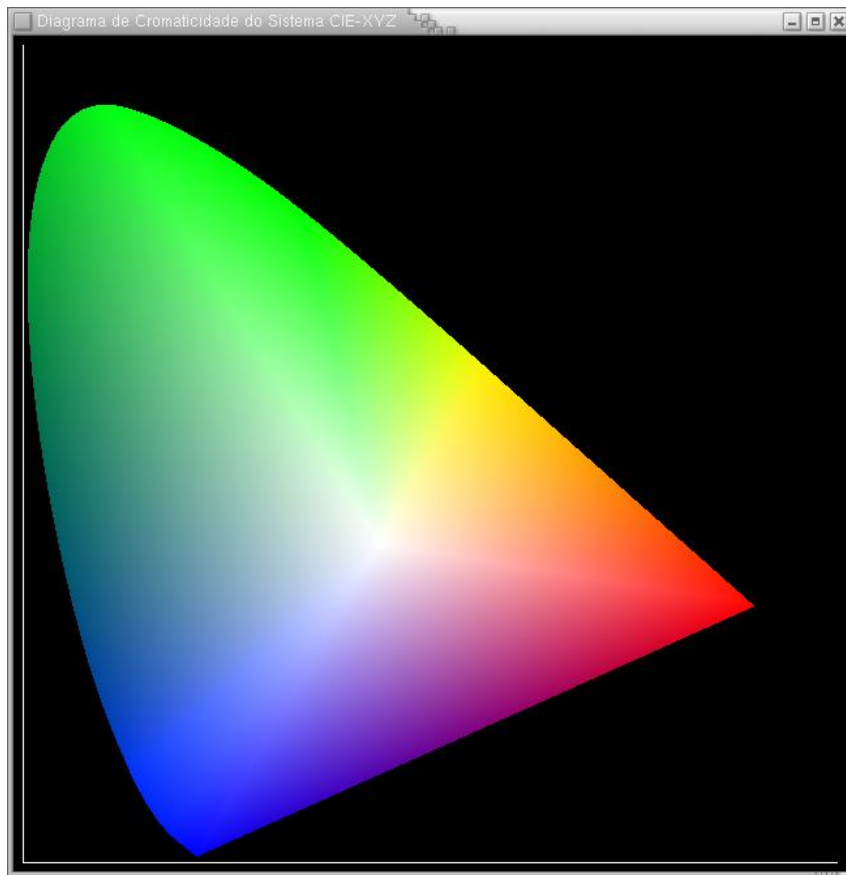


C̄ é complementar a C

↔

$$\alpha \underline{C} + \beta \underline{C} = \text{Branco}$$

Diagrama de Cromaticidade XYZ



Padrão CIE

- ▶ CIE – Commission Internationale de L'Eclairage (criada em 1913).
- ▶ Padrão CIE-RGB (1931) apresenta coordenadas negativas.
- ▶ Padrão CIE-XYZ foi criado para evitar coordenadas negativas.
 - ▶ Primárias não estão contidas no sólido de cor.
- ▶ Conversão CIE-RGB para CIE-XYZ é uma mera mudança de sistema de coordenadas.

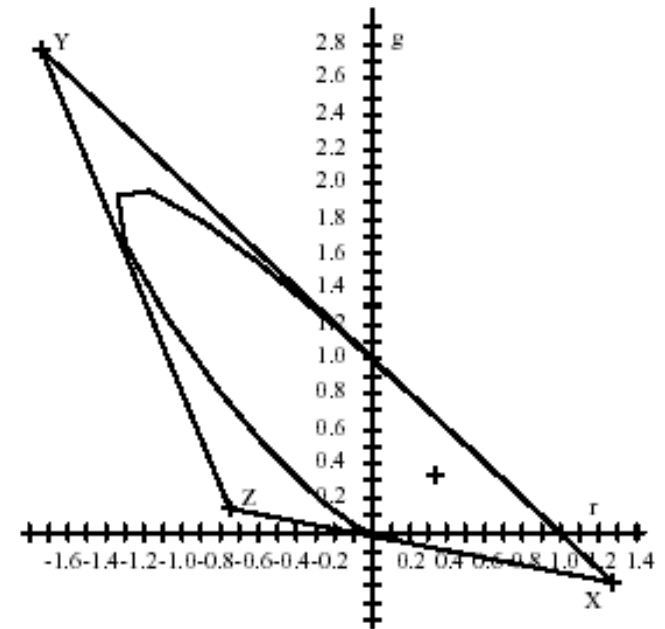
Bases CIE

- ▶ Bases CIE (vetores coluna).

rgb	x	y	z	xyz	r	g	b
r	1.2750	-1.7395	-0.7431	x	0.73467	0.27376	0.16658
g	-0.2779	2.7675	0.1409	y	0.26533	0.71741	0.00886
b	0.0029	-0.0280	1.6022	z	0.00000	0.00883	0.82456

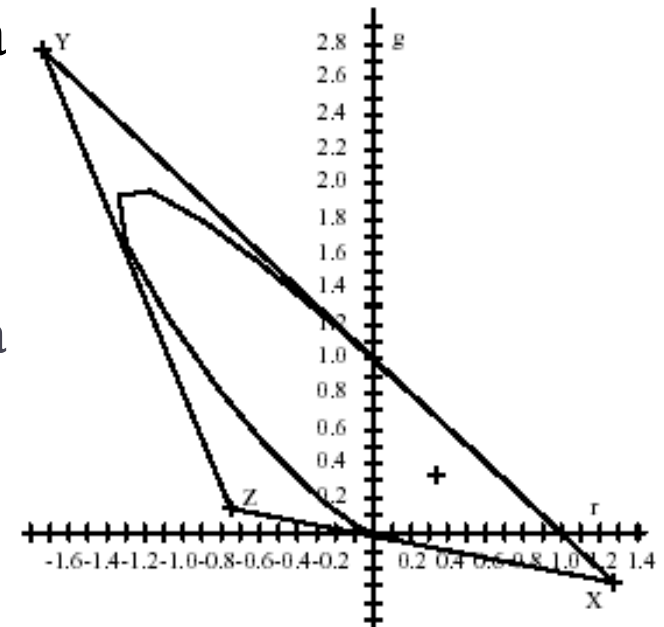
Criação do Sistema XYZ

- ▶ Duas cores primárias têm luminância zero.
- ▶ Informação de luminância na componente Y.
- ▶ Traça-se uma reta coincidente com o segmento quase retilíneo do diagrama de cromaticidade.
- ▶ Interseção desta reta com a reta de luminância zero define a primária X.



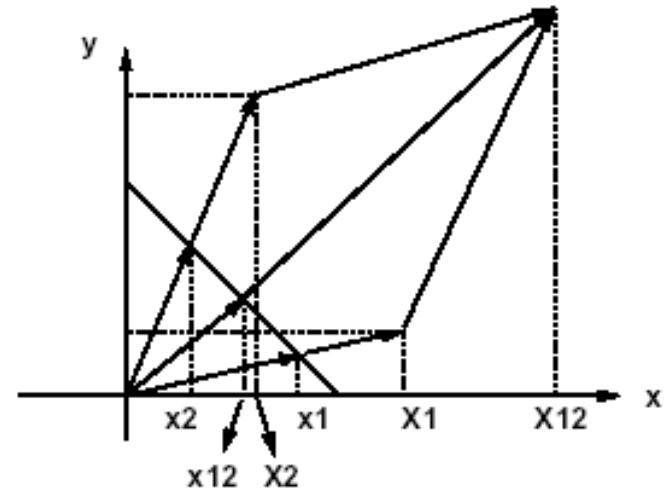
Construção Geométrica

- ▶ As duas outras primárias ficam definidas traçando-se uma outra reta tangente ao diagrama de cromaticidade.
- ▶ Esta reta minimiza a área do triângulo formado pela reta de luminância zero, a reta anterior e esta reta.
- ▶ Z está sobre a reta de luminância zero.



Branco Padrão

- ▶ Normalmente, usam-se as coordenadas tricromáticas (X_w, Y_w, Z_w) do branco padrão de referência:
 $(R_w, G_w, B_w) = (1, 1, 1)$



Matriz de Conversão

- ▶ Fazendo as contas usando $(X_w, Y_w, Z_w) = (R_w, G_w, B_w) = (1, 1, 1)$, obtém-se:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.489989 & 0.310008 & 0.200003 \\ 0.176962 & 0.812400 & 0.010638 \\ 0.000000 & 0.009999 & 0.990001 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.364666 & -0.896583 & -0.468083 \\ -0.515155 & 1.426409 & 0.088746 \\ 0.005203 & -0.014407 & 1.009204 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}.$$

Sistemas de Cor

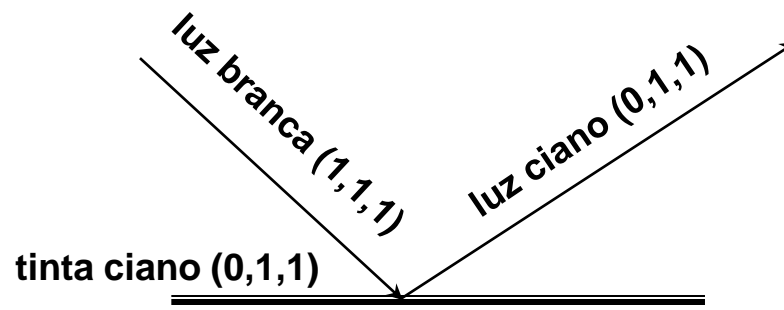
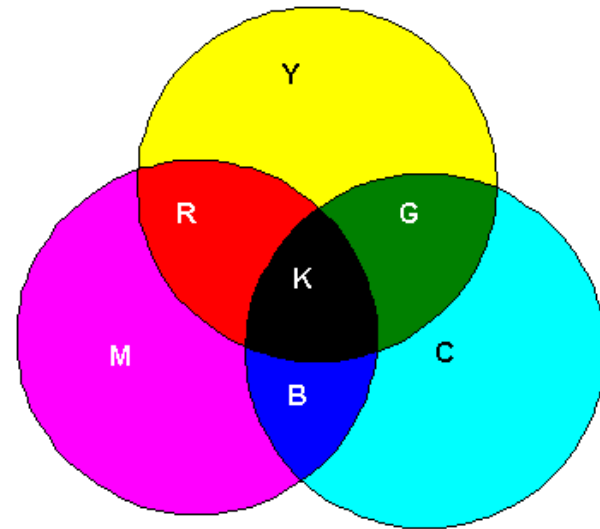
- ▶ Espaço de cor + sistema de coordenadas.
 - ▶ Sistemas Padrão.
 - ▶ Sistemas dos Dispositivos.
 - ▶ Sistemas Computacionais.
 - ▶ Sistemas de Interface.

Sistemas Padrão

- ▶ Independentes de dispositivos físicos.
- ▶ CIE-RGB.
 - ▶ 700 $m\mu$ (Red), 546 $m\mu$ (Green), 435.8 $m\mu$ (Blue).
- ▶ CIE-CMY.
 - ▶ Ciano (azul piscina), Magenta (violeta), Amarelo.
- ▶ CIE-XYZ.

Sistema CMY

- ▶ Sistema das Impressoras.
 - ▶ CMY ou CMYK.
- ▶ Processo predominantemente subtrativo.

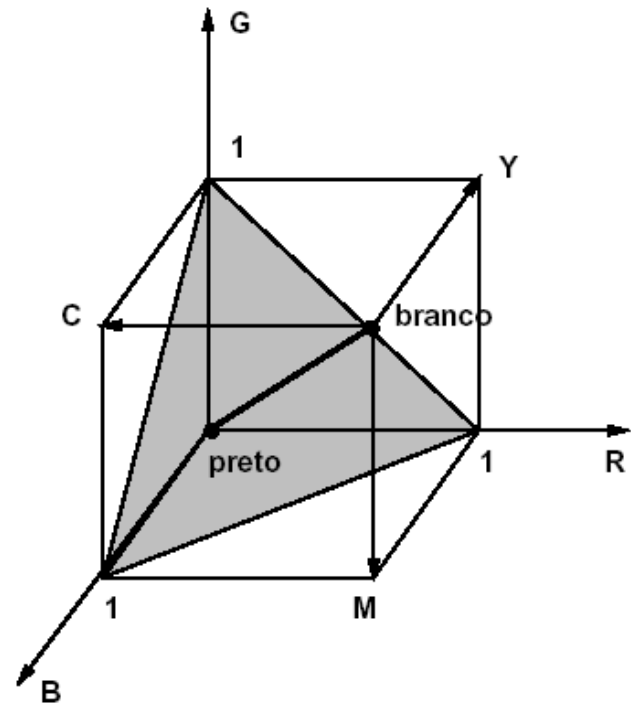
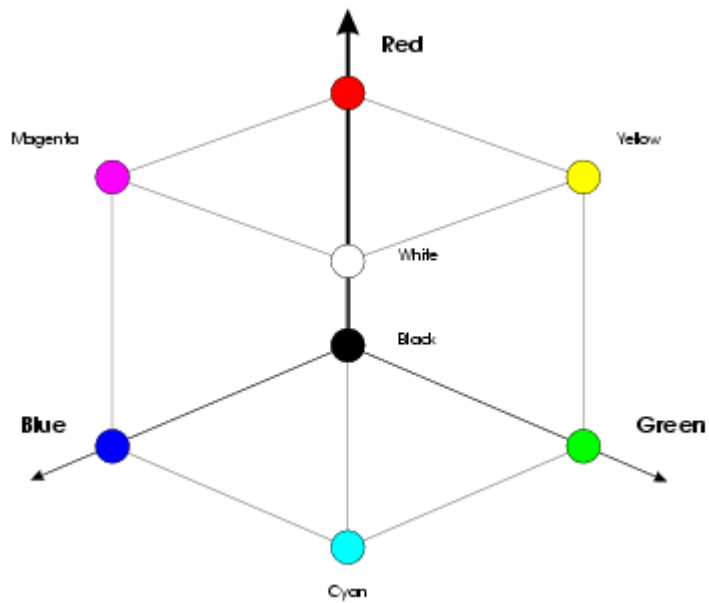


componente vermelha é absorvida

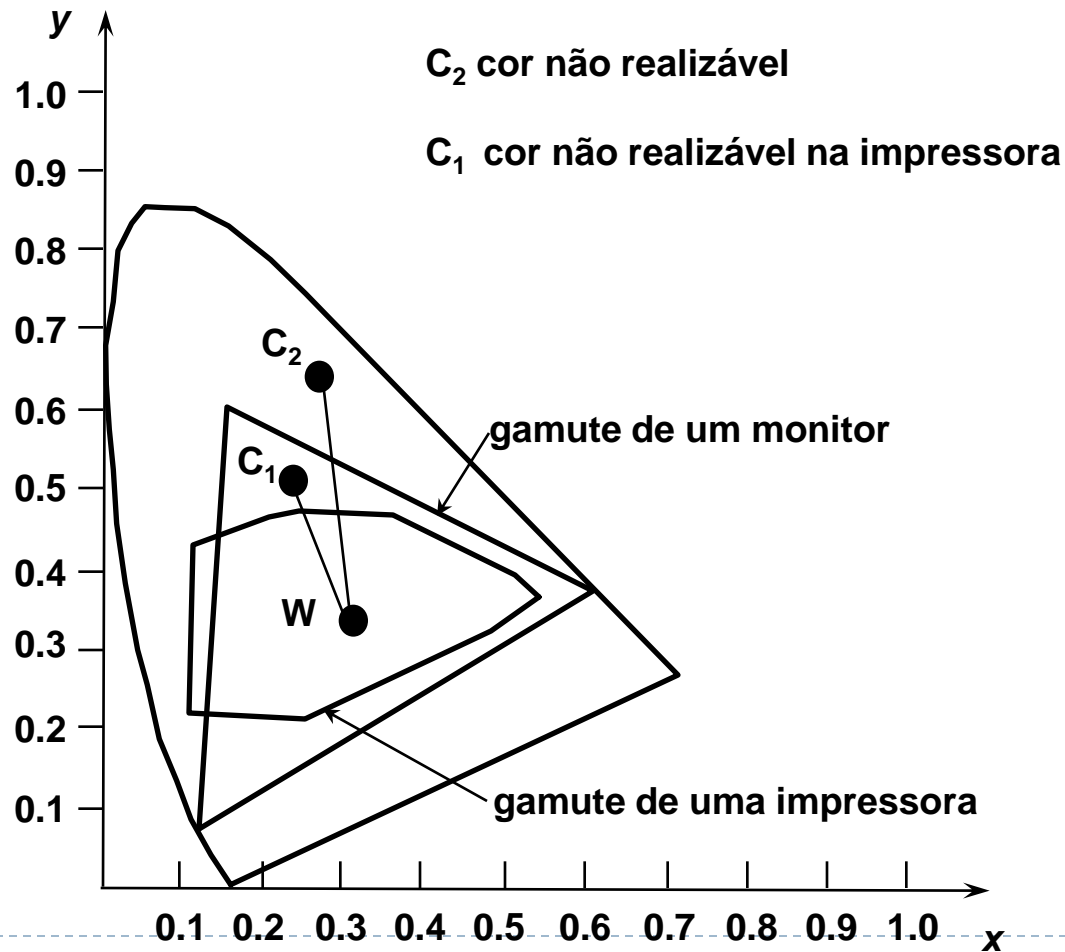
Sistemas dos Dispositivos

- ▶ Subconjunto do sólido de cor.
 - ▶ Contém todas as cores que podem ser geradas pelo dispositivo (combinação convexa da base de primárias do dispositivo).
- ▶ Forma de paralelepípedo e as faces são paralelogramos.
- ▶ Mudando-se as coordenadas ganha a forma de um **cubo**.

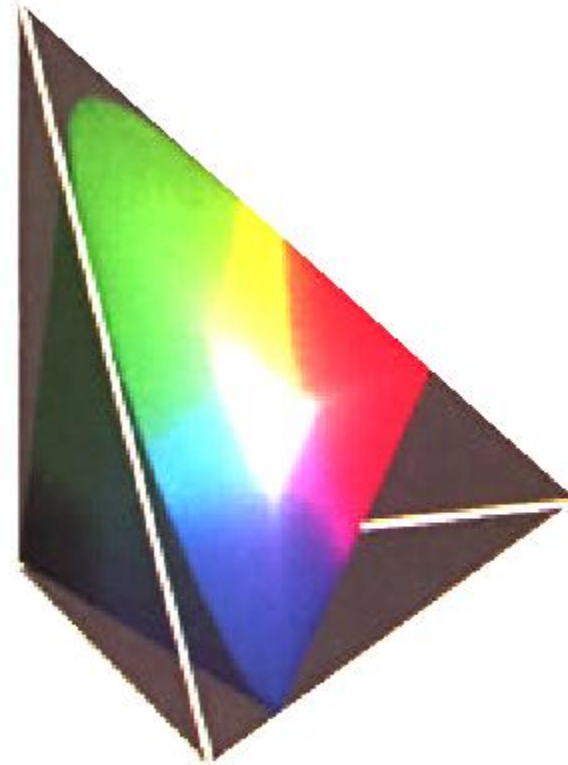
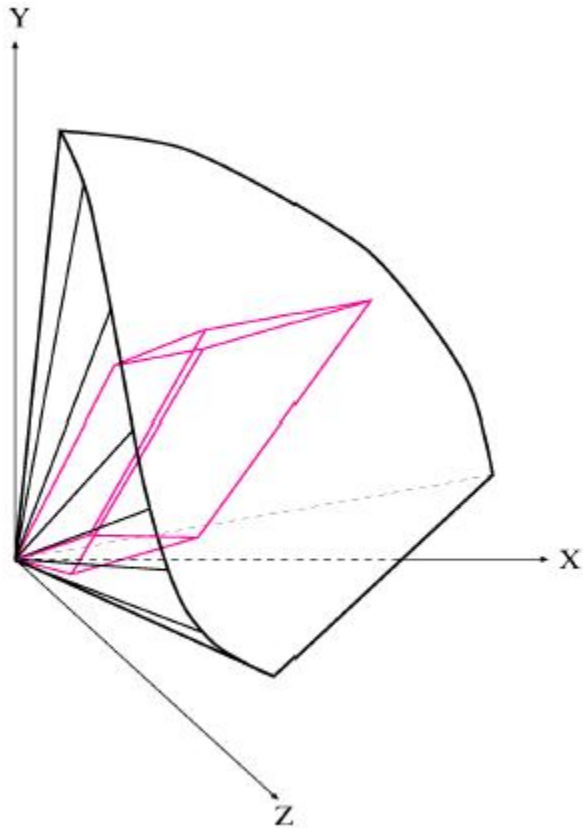
Cubo RGB



Gamutes



Gamute



Sistemas Computacionais

- ▶ Utilizados para **síntese** de imagens.
- ▶ Não são adequados à especificação de cor por um usuário.
- ▶ Pode ter dimensão maior do que três.

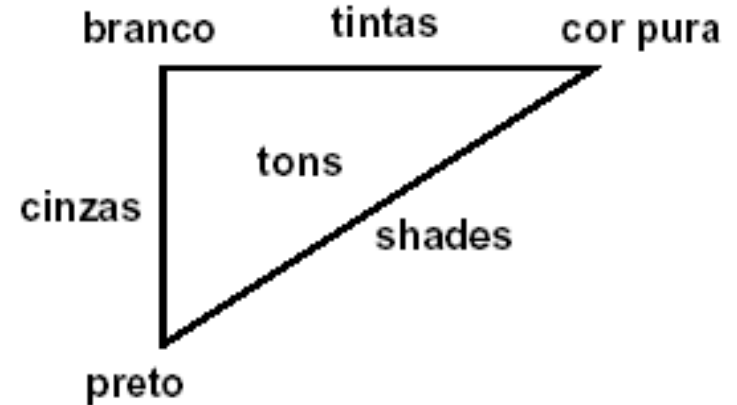
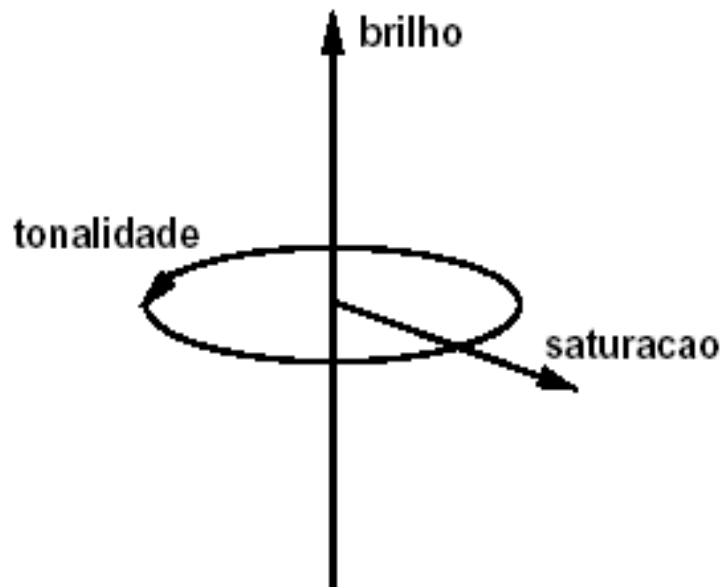
Sistemas de Interface

- ▶ Oferecem uma **interface** adequada a especificação de cores por um usuário comum.
- ▶ Em geral, especificam cores através de três parâmetros: matiz, saturação e luminância.

Tipos de Sistema de Interface

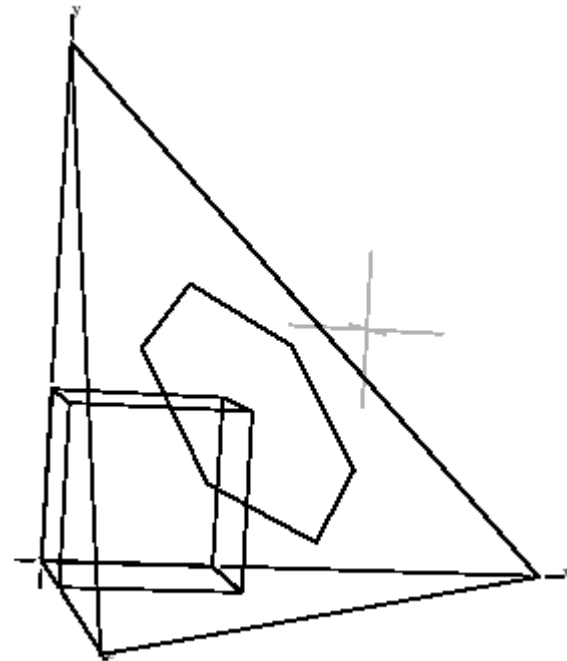
- ▶ Baseados em **coordenadas**: HSV, HSL.
- ▶ Baseados em **amostras**: Pantone, Munsell.

Paradigmas de Cor

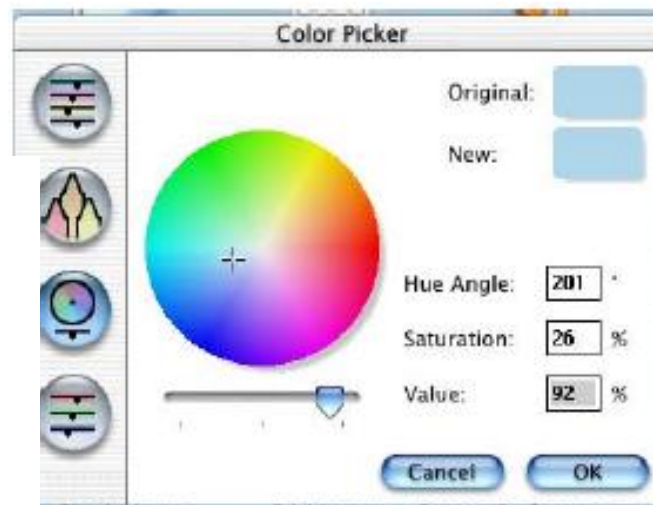
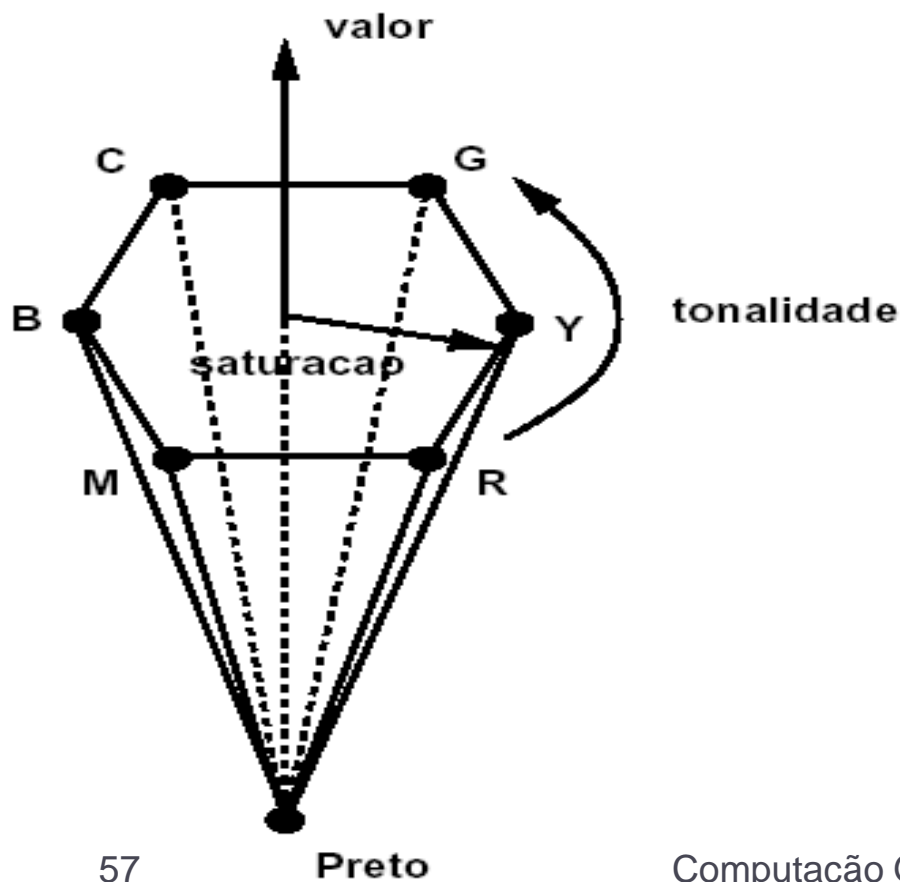


Sistema HSV

- ▶ Criado por Alvy Ray Smith.
- ▶ Projeta o cubo RGB ortogonalmente sobre o plano: $x + y + z = 3$.
- ▶ Conversão para RGB não é uma transformação linear.



Visualização do Sistema HSV



HSV color picker from Mac OS X's Finder

Sistema HSL

- ▶ Sistema

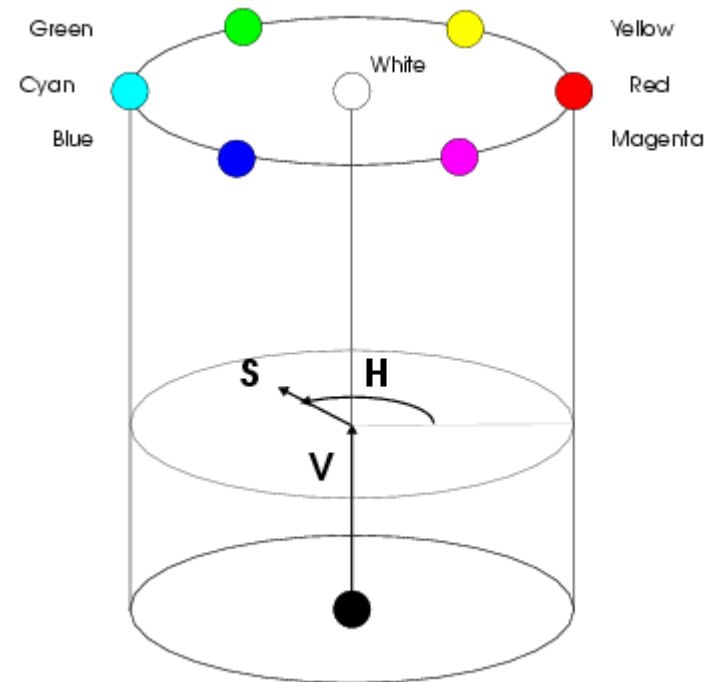
 - H (Hue)

 - S (Saturation)

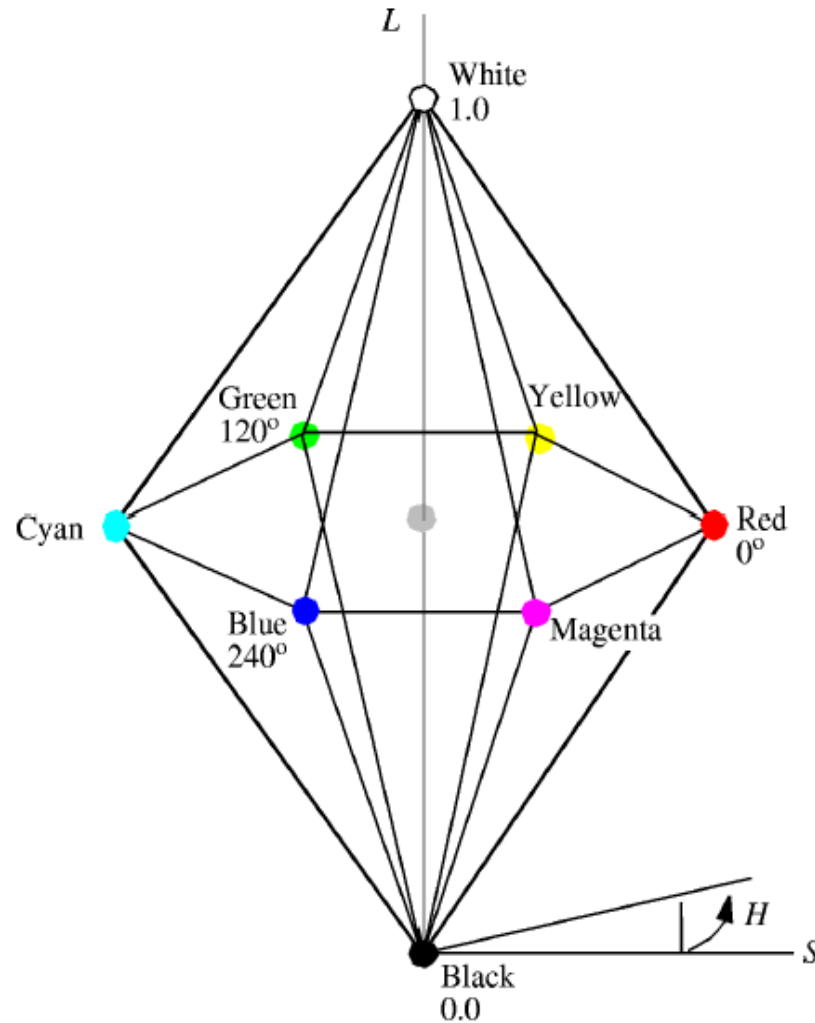
 - L (Lightness)

 - ▶ Patenteado pela Tektronix.

- ▶ Baseado no HSV.



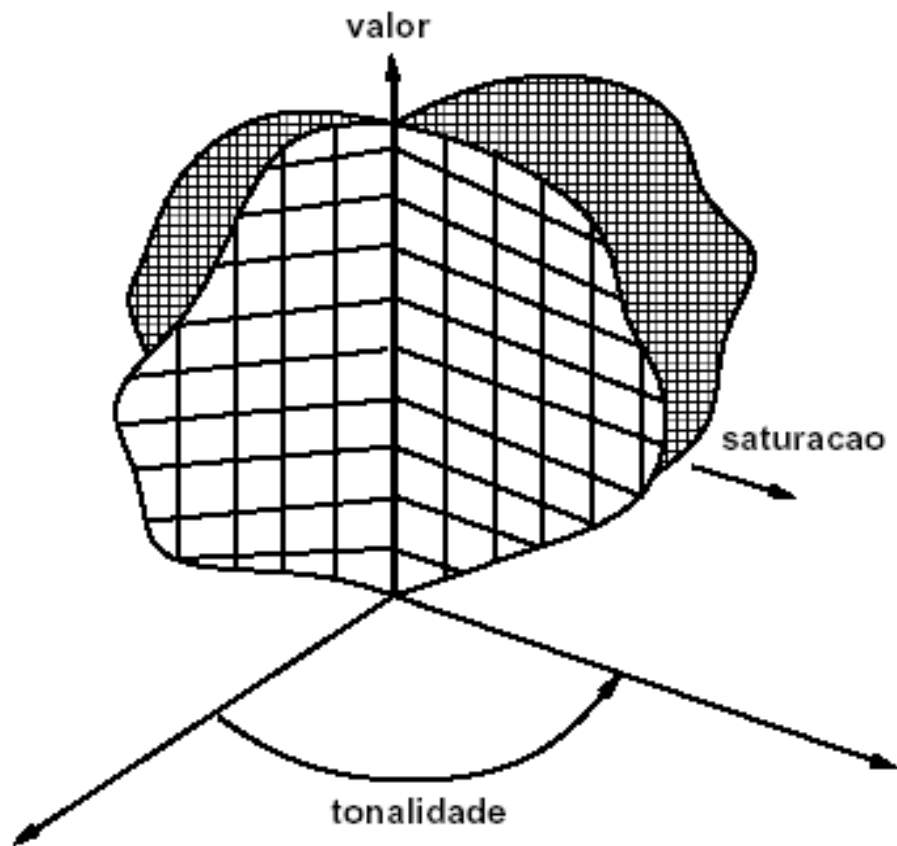
Sistema HSL



Sistemas Baseados em Amostras

- ▶ Amostram matizes, saturação e luminância.
- ▶ Sistema de Munsell (1915).
 - ▶ Obedece o critério da uniformidade perceptual.
- ▶ Sistema Pantone (1960).
 - ▶ Criado pela indústria gráfica.
 - ▶ Usado no processo de impressão em papel.

Sistema de Munsell



Correção Gama

- ▶ Assume luminância proporcional à voltagem.
 - ▶ Mas não é !!
 - ▶ Luminância \propto a potência do feixe de elétrons.
- ▶ Luminância \propto Voltagem $^\gamma$.
 - ▶ γ entre 1.5 e 3.0 (depende do monitor).
 - ▶ Deve pré-compensar valores RGB.
- ▶ Alguns monitores fazem a correção gama por hardware, outros não.