

IA725 Computação Gráfica I

1º semestre de 2006

Profª. Wu, Shin-Ting
ting@dca.fee.unicamp.br
Bloco A – sala 317

Prof. José Mario De Martino
martino@dca.fee.unicamp.br
Bloco A – sala 317-A

Agenda

Aula	Dia	Tema	Projeto
17	09/05/06	Cor	
18	12/05/06	Cor	
19	16/05/06	Iluminação	
20	19/05/06	Iluminação	
21	23/05/06	Iluminação	
22	26/05/06	Textura	
23	30/05/06	Textura	Versão 0.2
24	02/06/06	Rasterização	
25	06/06/06	Rasterização	
26	09/06/06	Recorte	
27	13/06/06	Recorte	
-	16/06/06		
28	20/06/06	Visibilidade	
29	23/06/06	Visibilidae	
30	27/06/06	Prova	Versão 0.3
	30/junho		Versão Final

Luz, Percepção Visual e Cor

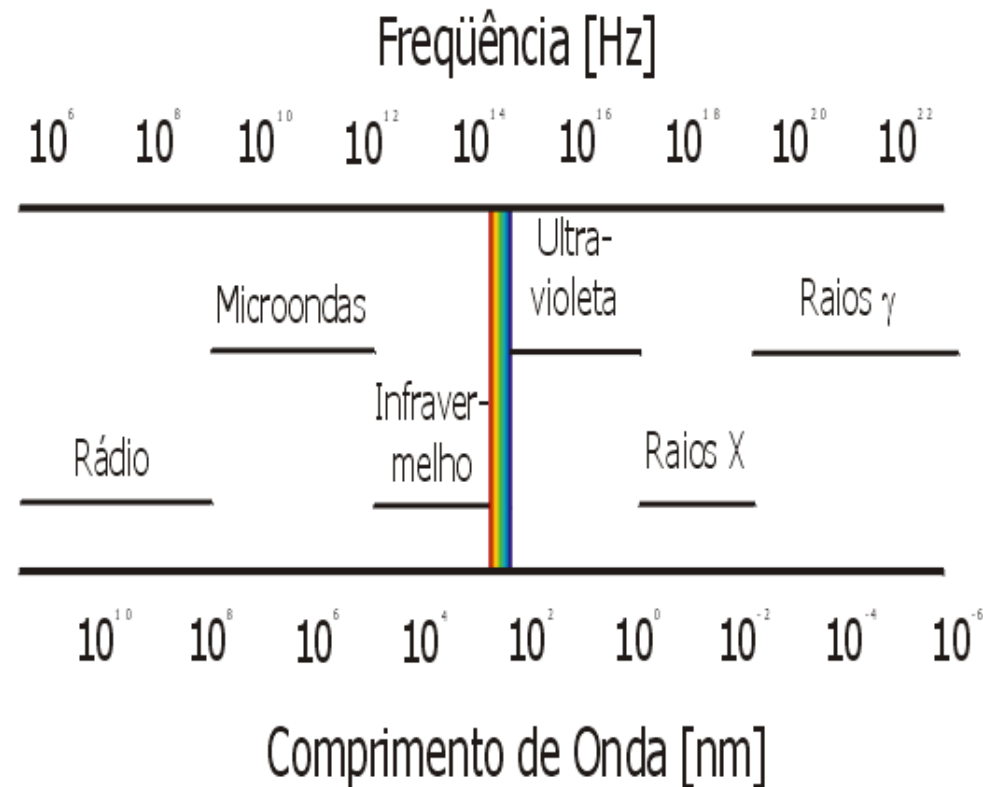
- Referências

- Computer Graphics Principles and Practice (2nd Edition)
- J. D. Foley, A. van Dam, S. K. Feiner, J. F. Hughes
- Addison-Wesley – 1990
- Visual Perception
- T. N. Cornsweet
- Academic Press – 1970
- Procedural Elements for Computer Graphics
- D. F. Rogers
- McGraw-Hill – 1988
- Illumination and Color in Computer Generated Imagery
- R. Hall
- Springer-Verlag - 1989

Luz e Percepção Visual

- Luz
 - *Física Clássica*: Onda Eletromagnética (explica fenômenos da reflexão, refração, difração, interferência, polarização).
 - *Física Quântica*: Característica corpuscular. Transporte de energia em pacotes com valores discretos (energia fóton = $h * f$; h cte de Planck; f frequência).
 - *Física Moderna*: dualidade onda/corpúsculo.
- Nesta disciplina prepondera o tratamento da Física Clássica:
 - Luz é energia visível transportada por onda eletromagnética (energia radiante visível).
 - Visível: capaz de estimular o sistema visual humano, produzindo sensação visual perceptível.

Luz e Percepção Visual



- Faixa Visível (aprox.)
 - 380 nm a 780 nm
 - 4×10^{14} a 8×10^{14} Hz

Percepção de Cores

- Percepção de cores
 - Processo que envolve as propriedades físicas da luz, sua transdução pelos fotoreceptores do olho em estímulos nervosos e a interpretação destes pelo cérebro. Envolve fenômenos físicos, fisiológicos e psicológicos.
 - É a luz advinda de um objeto, seja por reflexão, transmissão e/ou emissão que estimula o sistema visual humano permitindo que o objeto seja visualmente percebido.
 - A cor percebida de um objeto depende não só das características da superfície do objeto, mas também das características da iluminação, de objetos a sua volta e do sistema visual do observador.

Percepção de Cores

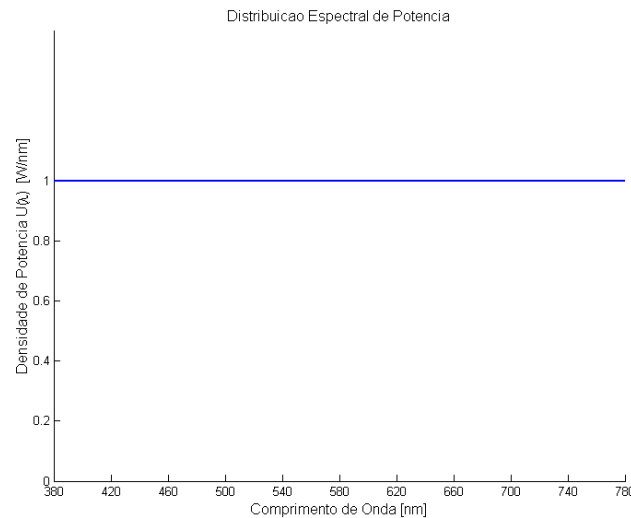
- Percepção de cores
 - É possível classificar a percepção da luz em duas categorias:
 - **Percepção Acromática:** associada à percepção do branco, preto e tons intermediários de cinza.
 - **Percepção Cromática:** associada à percepção do entendemos como vermelho, verde, azul, etc...

Percepção Acromática

- Luz acromática não possui uma matiz predominante (matiz é o que percebemos como vermelho, verde , amarelo, etc).
- Uma fonte de luz (emissor de luz) acromática é percebida como branca.
- Objetos acromáticos não emissores de luz refletem igualmente as componentes espectrais da luz incidente. Objetos acromáticos iluminados por luz acromática são percebidos com branco, preto ou algum tom intermediário de cinza (branco refletem mais do que 80%; preto refletem menos do que 3%).

Percepção Acromática

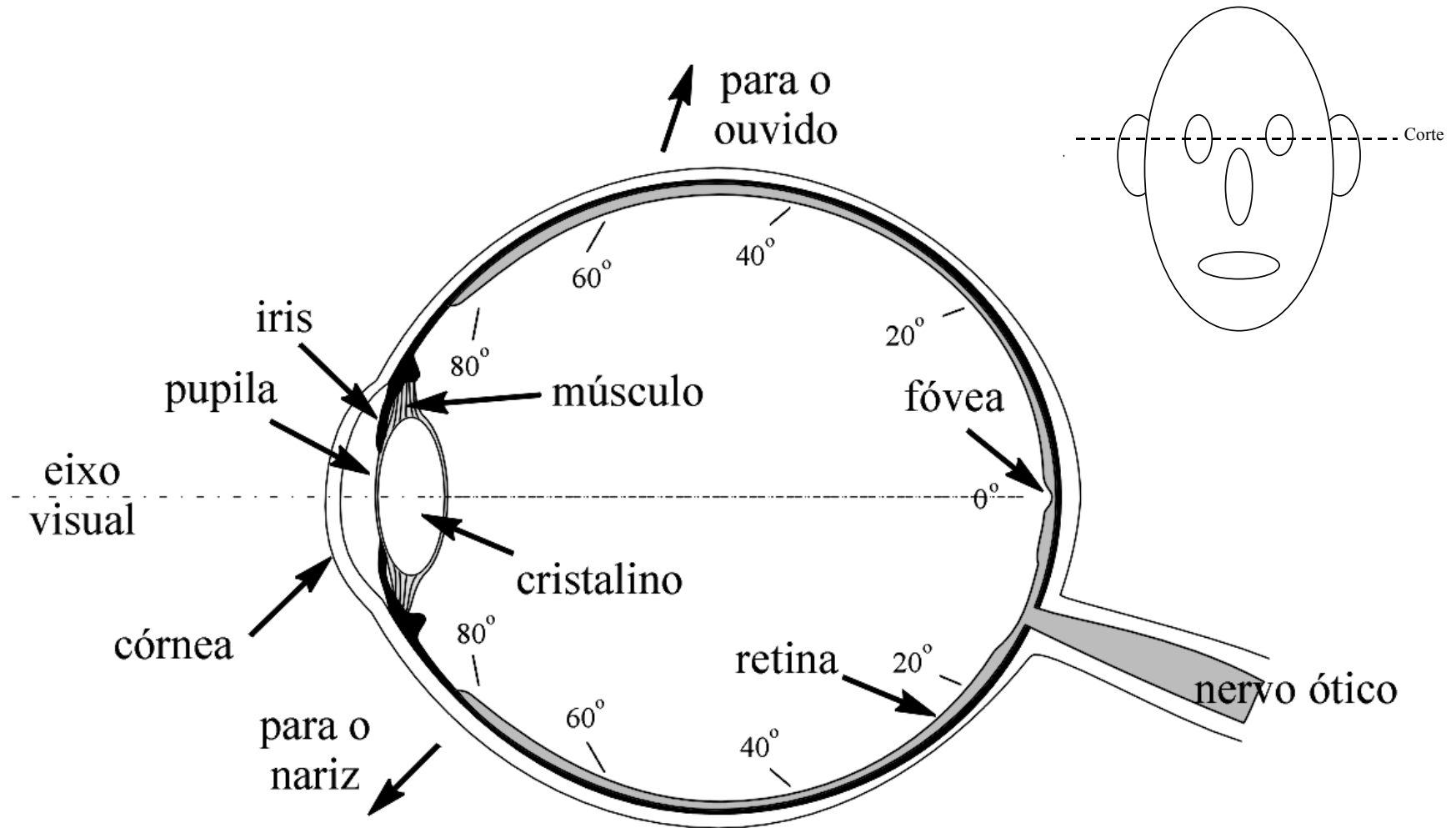
- O atributo que varia entre duas percepção distintas de luz acromática (dois tons de cinza – mais claro e mais escuro) é o **brilho/luminosidade** (*brightness* – emissores / *lightness* – refletores).
- Uma composição espectral aproximadamente constante (cada componente espectral com mesma potência) é percebida com acromática.



Percepção Cromática

- A sensação visual da luz cromática é mais rica do que a da luz acromática. Além da **brilho/luminosidade** (*brightness* – emissores / *lightness* – refletores), a luz cromática possui ainda matiz (*hue*) e saturação (*saturation*).
- **Matiz** (hue): cor pura associada (vermelho, verde)
- **Saturação** (saturation): grau de diluição da cor pura em branco (tons de rosa)
- **Brilho/Luminosidade** (brightness/lightness): para superfícies emissoras (brightness) a quantidade de energia; emitida/refletida; para superfícies não emissoras (lightness) a quantidade de energia refletida.

O Olho Humano



O Olho Humano

- **Córnea:** extensão transparente do tecido branco e opaco que reveste o globo ocular. Sua superfície externa é mantida limpa e em boas condições ópticas por fina camada de água salgada, a qual é reposta de tempos em tempos pelo piscar das pálpebras.
- **Íris:** diafragma que controla a abertura da pupila.
- **Pupila:** orifício da íris através do qual a luz passa para atingir o interior do olho. A pupila de um olho saudável é preta, uma vez que a luz ao entrar no olho é totalmente absorvida, não sendo refletida de volta. Músculos envolvem a íris e controlam a abertura da pupila em função da intensidade luminosa.

O Olho Humano

- **Cristalino:** tecido transparente e flexível que atua com lente do sistema visual. A espessura e, portanto, as características ópticas do cristalino é controlado por músculos radiais e circulares que o envolvem.
- **Retina:** é uma estrutura complexa formada de células fotoreceptoras e tecidos nervosos. As células fotoreceptoras ao serem estimuladas pela luz geram impulsos nervosos de natureza eletro-química que são conduzidos pelos tecidos nervosos até o nervo óptico e deste para o cérebro. Existem dois tipos de células fotoreceptoras: **cones** e **bastonetes**.

Bastonetes

- Células fotoreceptoras responsáveis pela **visão noturna** ou escotópica.
- Ligação ao nervo óptico em grupos implicando em **maior sensibilidade à radiação luminosa** (soma de estímulos de diversos bastonetes)
- Geram **apenas sensação acromática** (branco, tons de cinza e preto).
- A **fotosensibilidade dos bastonetes** está associada à absorção da energia radiante por pigmento fotosensível denominado **Rodopsina**.

Bastonetes

- Durante a **absorção da luz**, a **Rodopsina é consumida** (transformada).
- A reposição da **Rodopsina** acontece por um processo de **regeneração relativamente lento**: uma vez que a tenha sido totalmente consumida, a reposição exige aproximadamente meia hora sem exposição à luz.
- Em uma situação de iluminação diurna, caracterizada por uma longa exposição a um energia radiante relativamente intensa, tem-se o consumo total da rodopsina sem a oportunidade de reposição, tornando **nula a contribuição dos bastonetes na percepção visual diurna**.

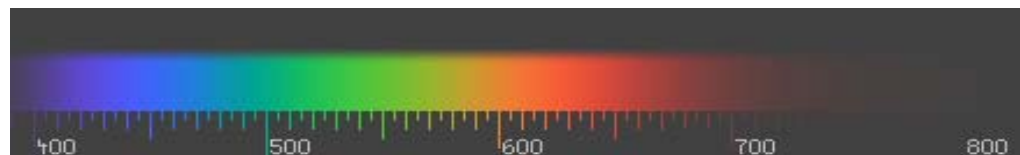
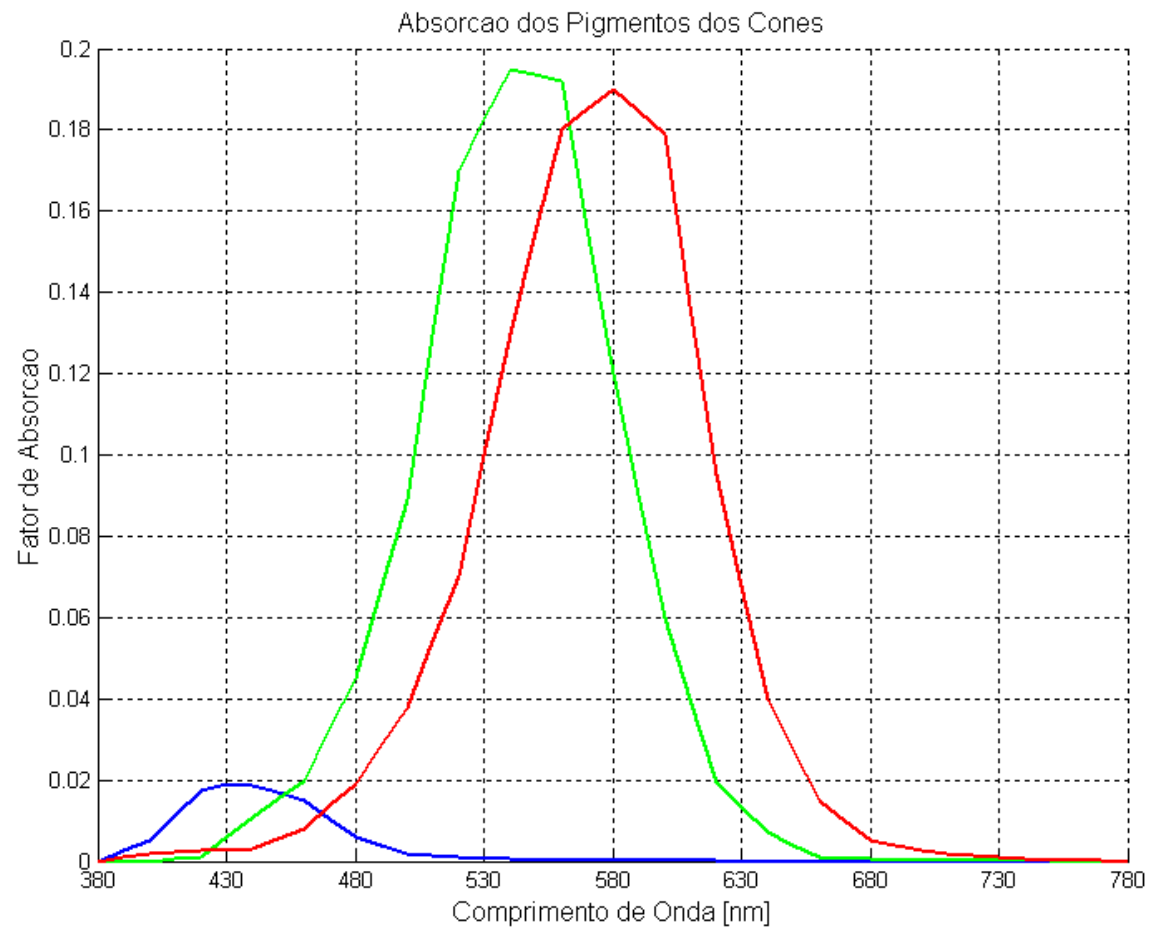
Cones

- Células fotoreceptoras responsáveis pela **visão diurna** ou fotópica.
- Estão ligados individualmente ao nervo óptico (**menor sensibilidade à luz que os bastonetes**).
- Responsáveis pela **sensação cromática** (permitem a distinção entre, por exemplo, amarelo e vermelho).

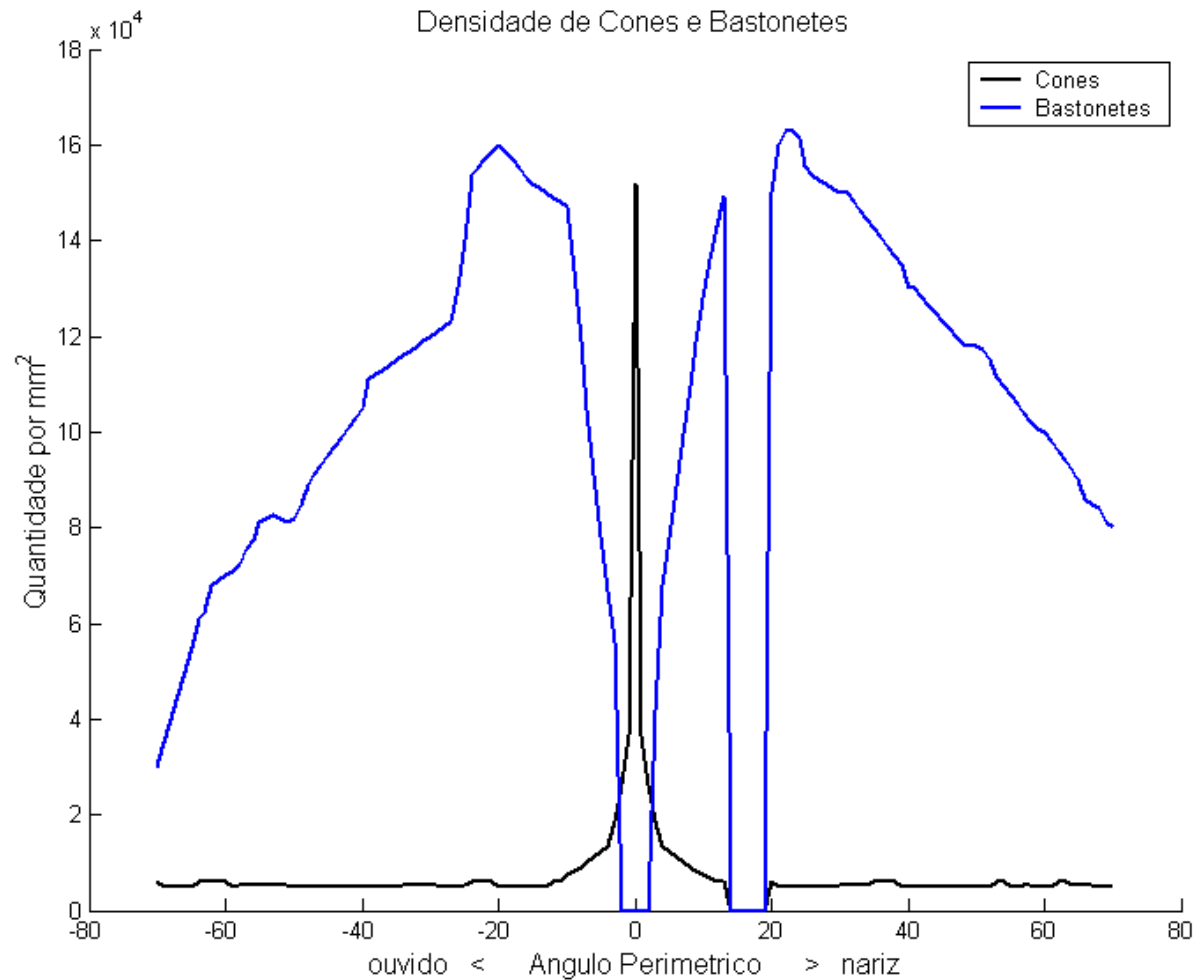
Cones

- Existem **3 tipos de Cones**, cada um absorvendo a energia luminosa em faixas distintas do espectro visível:
 - Faixa de comprimento de onda pequeno (violeta-azul);
 - Faixa intermediária (verde-amarelo);
 - Faixa de comprimento de onda grande (amarelo-vermelho).

Cones



Distribuição de Cones e Bastonetes na Retina



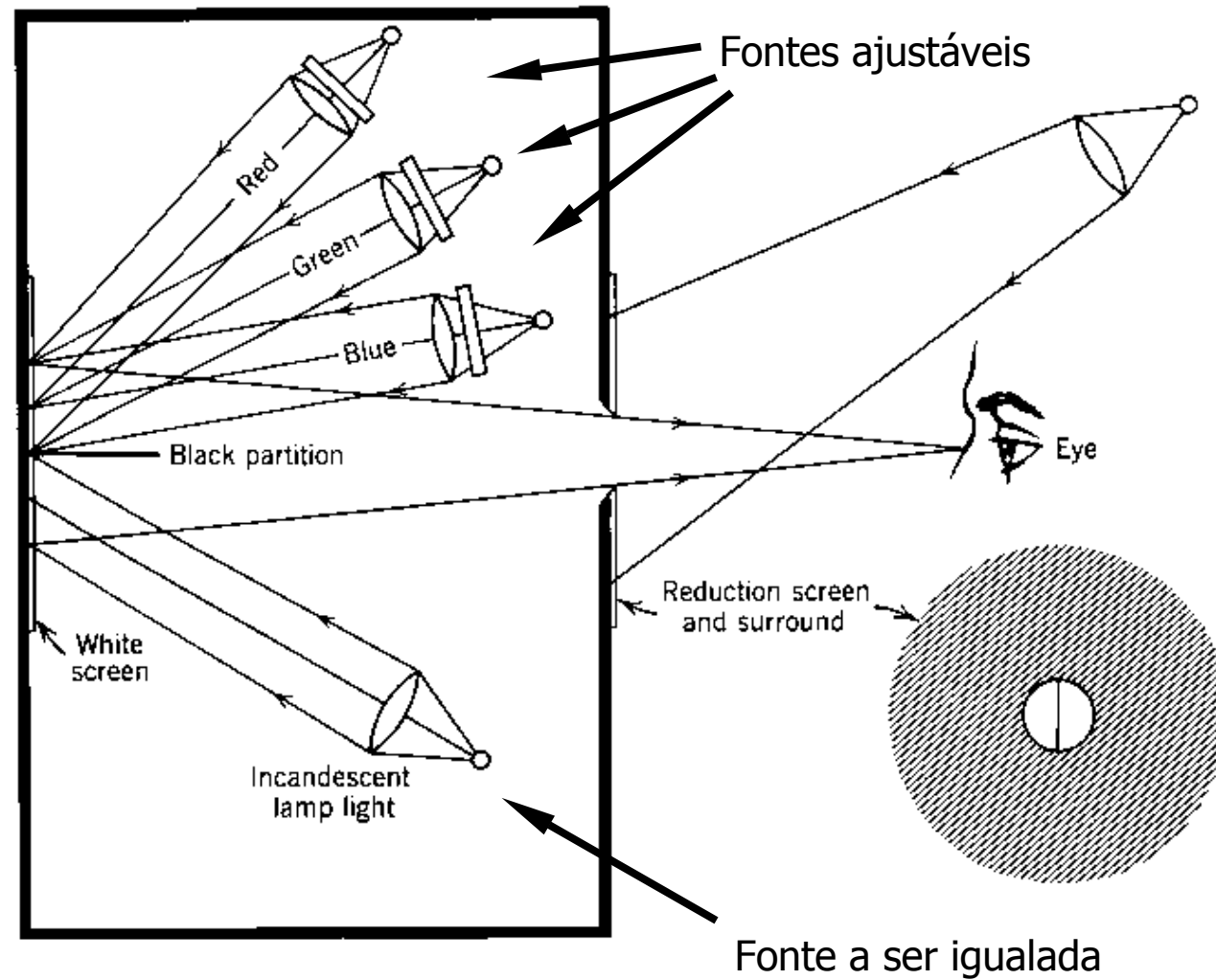
Distribuição de Cones e Bastonetes na Retina

- Os Cones e Bastonetes se distribuem de maneira simétrica ao redor da região central da retina denominada **Fóvea** (*fovea centralis*).
- A **Fóvea** é caracterizada por uma **alta concentração de Cones** e praticamente **nenhum Bastonete** (Fóvea tem uma área de aprox. **1 mm²** em adultos - aprox. 2°).
- Até aprox. 5° os cones são abundantes, misturados a poucos bastonetes. A partir deste ponto a densidade dos cones cai drasticamente e a dos bastonetes aumenta significativamente.

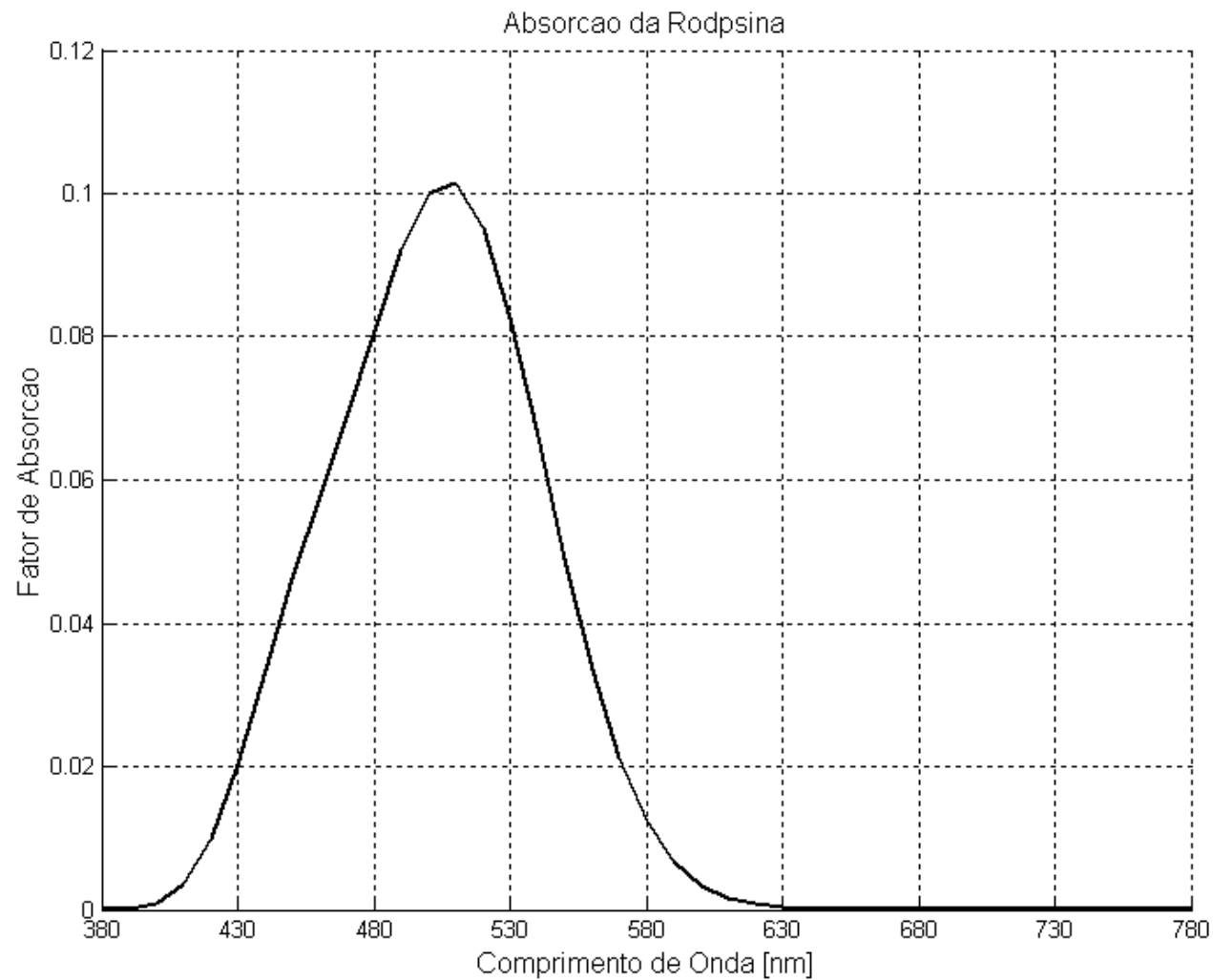
Distribuição de Cones e Bastonetes na Retina

- A densidade dos bastonetes atinge um máximo em torno de 20° , diminuindo lentamente a partir deste ponto.
- No **ponto onde o nervo óptico chega à retina** temos uma pequena região sem fotoreceptores - o denominado **Ponto Cego**.

Igualação de Cores



Visão Monocromática



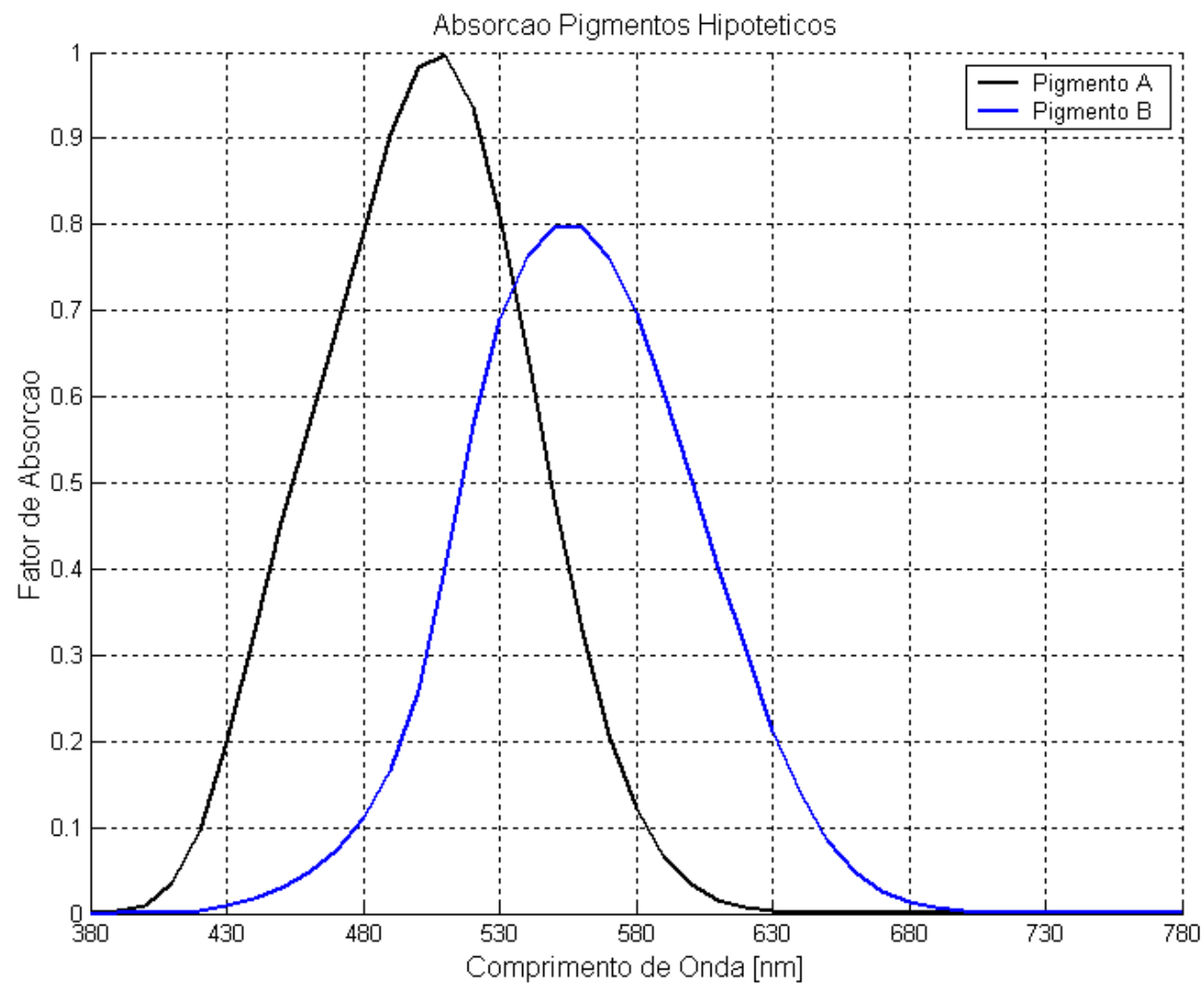
Visão Monocromática

- Exemplo igualação (mesma potência → mesma sensação)
 - Qual deve ser a potência do Estímulo 2 para igualar a potência absorvida com Estímulo 1?
 - Estímulo 1
 - 480 nm
 - Potência incidente: 1000 unidades de potência
 - Fator absorção Rodopsina: 0.8 (aprox.)
 - Estímulo 2
 - 570 nm
 - Fator absorção Rodopsina: 0.08 (aprox.)

Visão Monocromática

- Ajustando a potência de um estímulo é possível igualar potência absorvida por outro estímulo.
- Dada uma luz monocromática com determinado comprimento de onda, sempre é sempre possível produzir a mesma sensação visual desta luz regulando a potência de outra luz monocromática com um comprimento de onda arbitrário (com apenas uma luz de potência regulável consigo produzir a sensação visual de qualquer outra luz).
- Não há discriminação em função do comprimento de onda, apenas associada à intensidade.

Visão Dicromática



Visão Dicromática

- Exemplo igualação (mesma potência $\rightarrow$ mesma sensação)
 - Qual deve ser a potência do Estímulo 2 para igualar a potência absorvida com Estímulo 1 nos canais A (pigmento A) e B (pigmento B)?
 - Estímulo
 - λ_1
 - Potência incidente: P_1
 - Fator absorção pigmento A: a_1
 - Fator absorção pigmento B: b_1
 - Estímulo
 - λ_2
 - Fator absorção pigmento A: a_2
 - Fator absorção pigmento B: b_2

Visão Dicromática

- No caso geral, ajustando a potência de um estímulo não é possível igualar a potência absorvida de outro estímulo. Há, portanto, (certa) capacidade para discriminar o comprimento de onda.
- Exceção ao caso geral: Razão de absorção dos pigmentos para um estímulo é igual ao outro (podem ocorrer na prática em regiões com baixíssimo fator de absorção, portanto os efeitos são imperceptíveis).

Visão Dicromática

- Exemplo igualação
 - Qual deve ser a potência dos Estímulo 1 e 3 para igualar a potência absorvida com Estímulo 2 nos canais A (pigmento A) e B (pigmento B)?
 - Estímulo 1 (fonte variável)
 - λ_1
 - Fator absorção pigmento A: a_1
 - Fator absorção pigmento B: b_1
 - Estímulo 2 (fonte a ser igualada)
 - λ_2
 - Potência incidente: P_2
 - Fator absorção pigmento A: a_2
 - Fator absorção pigmento B: b_2
 - Estímulo 3 (fonte variável)
 - λ_3
 - Fator absorção pigmento A: a_3
 - Fator absorção pigmento B: b_3

Visão Dicromática

- Exemplo igualação
 - Qual deve ser a potência dos Estímulo 1 e 3 para igualar a potência absorvida com Estímulo 2 nos canais A (pigmento A) e B (pigmento B)?
 - Estímulo 1 (fonte variável)
 - $\lambda_1 = 480 \text{ nm}$
 - Fator absorção pigmento A: $a_1 = 0.8$
 - Fator absorção pigmento B: $b_1 = 0.1$
 - Estímulo 2 (fonte a ser igualada)
 - $\lambda_2 = 530 \text{ nm}$
 - Potência incidente: $P_2 = 1000$
 - Fator absorção pigmento A: $a_2 = 0.8$
 - Fator absorção pigmento B: $b_2 = 0.7$
 - Estímulo 3 (fonte variável)
 - $\lambda_3 = 580$
 - Fator absorção pigmento A: $a_3 = 0.1$
 - Fator absorção pigmento B: $b_3 = 0.7$

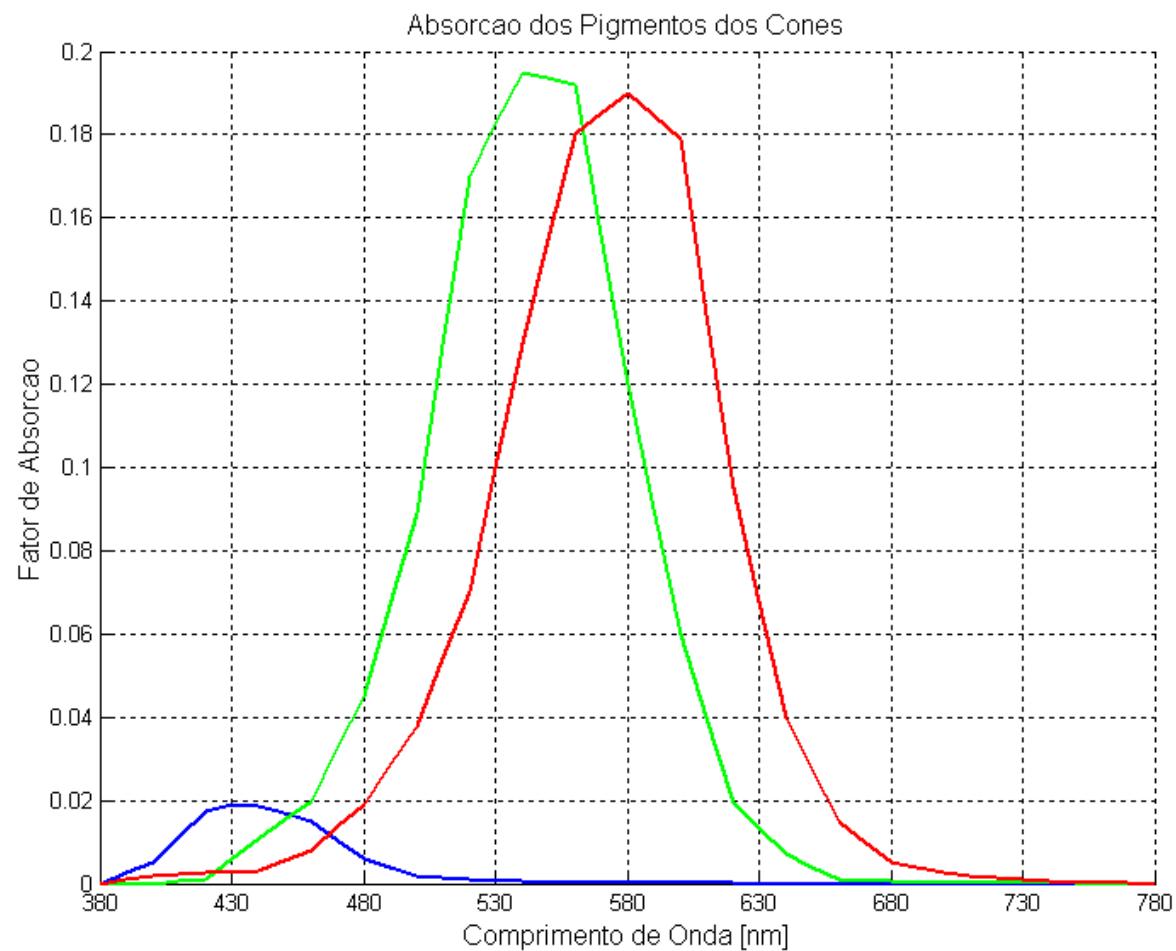
Visão Dicromática

- Exemplo igualação
 - Qual deve ser a potência dos Estímulo 1 e 3 para igualar a potência absorvida com Estímulo 2 nos canais A (pigmento A) e B (pigmento B)?
 - Estímulo 1 (fonte variável)
 - $\lambda_1 = 530 \text{ nm}$
 - Fator absorção pigmento A: $a_1 = 0.8$
 - Fator absorção pigmento B: $b_1 = 0.7$
 - Estímulo 2 (fonte a ser igualada)
 - $\lambda_2 = 480 \text{ nm}$
 - Potência incidente: $P_2 = 891$
 - Fator absorção pigmento A: $a_2 = 0.8$
 - Fator absorção pigmento B: $b_2 = 0.1$
 - Estímulo 3 (fonte variável)
 - $\lambda_3 = 580$
 - Fator absorção pigmento A: $a_3 = 0.1$
 - Fator absorção pigmento B: $b_3 = 0.7$

Visão Dicromática

- É possível produzir a sensação visual de **um estímulo** de determinado comprimento de onda pela **combinação** de **outros dois estímulos** de comprimento de onda **diferentes**.
- Valores negativos não são realizáveis na prática (teria que subtrair energia), entretanto, posso satisfazer esta condição colocando a fonte ajustável com valor negativo do lado da fonte teste.

Visão Tricromática



Visão Tricromática – Leis de Grassmann

- Lei da Simetria
 - $A = B$, então $B = A$. Se é possível igualar estímulo de cor A com um estímulo de cor B, então é possível igualar o estímulo de cor B com o estímulo de cor A.
- Lei da Transitividade
 - $A = B$ e $B = C$, então $A = C$. Se estímulo de cor A é igualável com estímulo de cor B e estímulo de cor B é igualável com estímulo de cor C, então estímulo de cor A é igualável com o estímulo de cor C.
- Lei da Proporcionalidade
 - Se $A = B$, então $\alpha A = \alpha B$; onde α é um fator de acréscimo ou decréscimo da potência da fonte luminosa.
- Lei da Aditividade
 - Se $A = B$ e $C = D$, então $(A + C) = (B + D)$

Representação de Cor

- Espaço de cores é um espaço vetorial de dimensão 3.
- Representação vetorial

$$\overline{\mathbf{C}} = R\overline{\mathbf{R}} + G\overline{\mathbf{G}} + B\overline{\mathbf{B}}$$

onde :

$\overline{\mathbf{R}}$, $\overline{\mathbf{G}}$ e $\overline{\mathbf{B}}$ são vetores linearmente independentes.

Representação de Cor

- Adição de 2 cores

$$\overline{C}_1 = R_1 \overline{R} + G_1 \overline{G} + B_1 \overline{B}$$

$$\overline{C}_2 = R_2 \overline{R} + G_2 \overline{G} + B_2 \overline{B}$$

$$\overline{C}_1 + \overline{C}_2 = (R_1 + R_2) \overline{R} + (G_1 + G_2) \overline{G} + (B_1 + B_2) \overline{B}$$

- Obs.: Os coeficientes podem ser negativos, considerando a possibilidade adicionar um estímulo primário ao estímulo C

$$\overline{C}_1 + R_1 \overline{R} = G_1 \overline{G} + B_1 \overline{B}$$

$$\overline{C}_1 = -R_1 \overline{R} + G_1 \overline{G} + B_1 \overline{B}$$

$$\overline{C}_1 = R'_1 \overline{R} + G_1 \overline{G} + B_1 \overline{B} \quad \text{onde } R'_1 \text{ é negativo}$$

Representação de Cor

- Adição de n cores

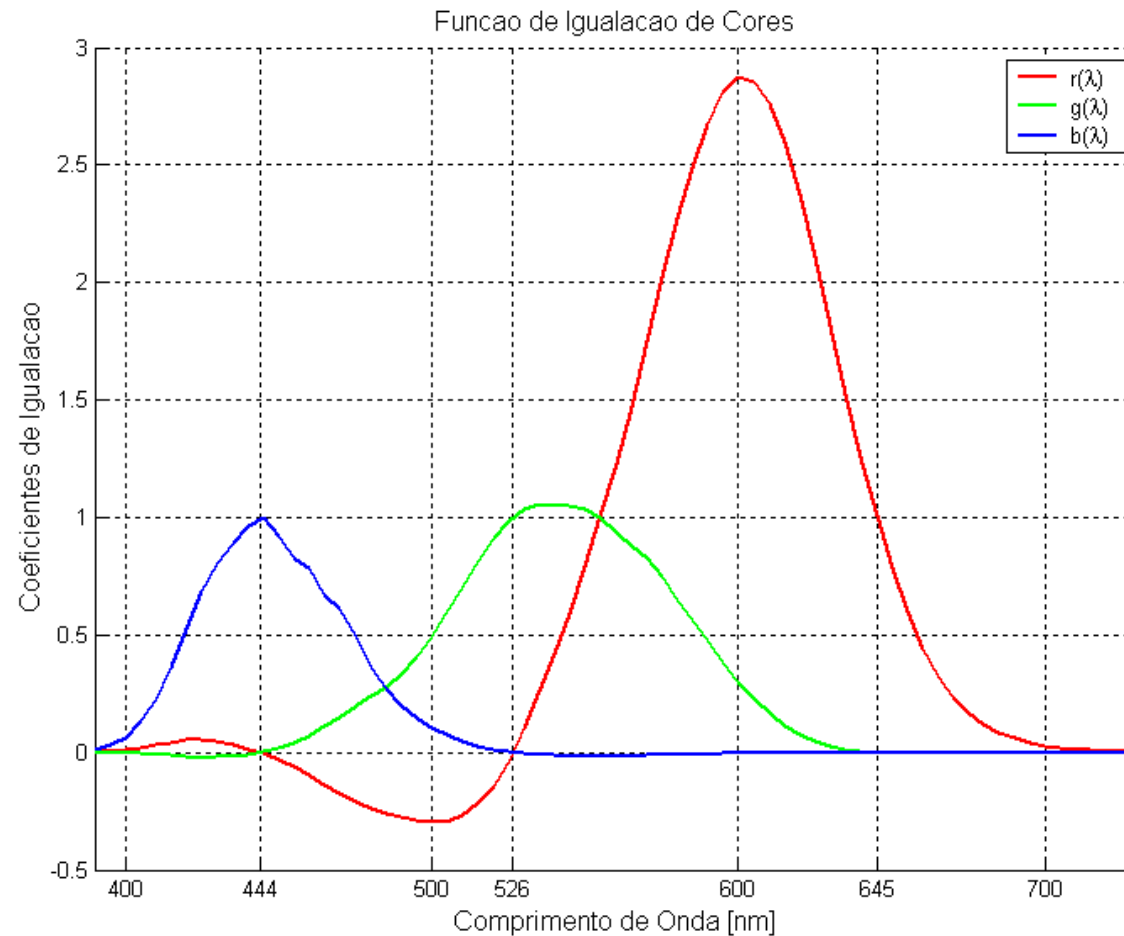
$$\overline{\mathbf{C}} = \overline{\mathbf{C}}_1 + \overline{\mathbf{C}}_2 + \dots + \overline{\mathbf{C}}_n$$

$$\overline{\mathbf{C}} = \sum_{i=1}^n R_i \overline{\mathbf{R}} + \sum_{i=1}^n G_i \overline{\mathbf{G}} + \sum_{i=1}^n B_i \overline{\mathbf{B}}$$

- O processo discreto de adição de cores pode ser generalizado para o caso contínuo. Para estímulo com uma composição espectral arbitrária contínua tem-se um processo de integração.

Função de Igualação de Cores (CMF)

- Estímulos Primários $\cong 444 \text{ nm}$, 526 nm e 645 nm



Função de Igualação de Cores (CMF)

- O resultado do processo de integração são os valores dos estímulos primários.

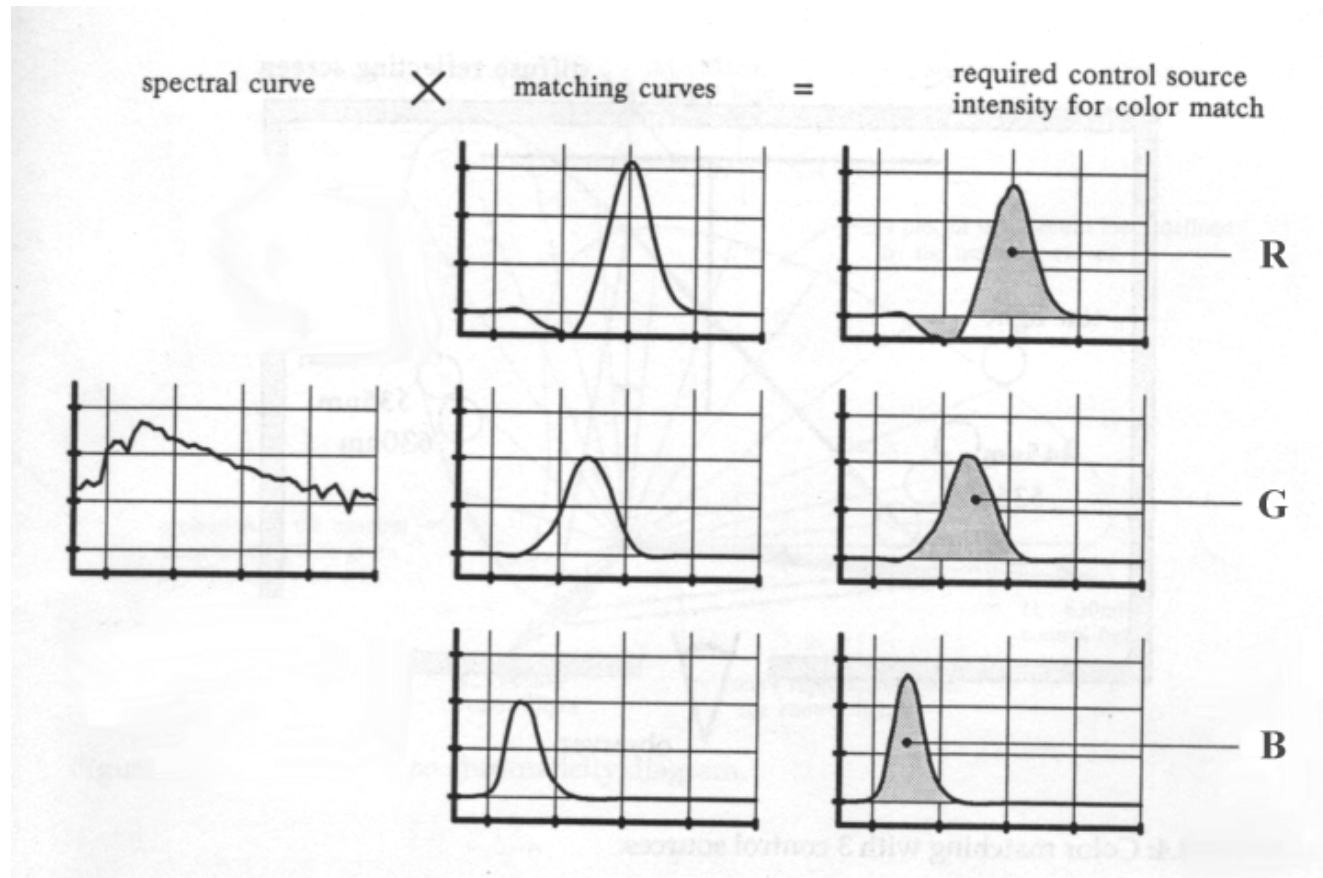


Diagrama de Cromaticidade CIE–XYZ

- Motivação
 - Definição de 3 estímulos primários X, Y e Z artificiais (não realizáveis fisicamente), para entre outros aspectos:
 - Evitar valores negativos.
 - Um das funções de igualação, associada ao estímulo Y, corresponder à curva de Eficácia Luminosa Espectral para a visão diurna (demanda da televisão preto-e-branco).
 - Áreas das curvas de igualação iguais.
- CIE – Commission Internationale de L'Eclairage

Diagrama de Cromaticidade – CIE XYZ

- **Eficácia Luminosa Espectral** de uma radiação monocromática de comprimento de onda λ [sendo $V(\lambda)$ para a visão fotópica e $V'(\lambda)$ para a visão escotópica], é a razão do fluxo radiante de comprimento de onda λ_m , para o fluxo de comprimento de onda λ , os dois fluxos produzindo sensações luminosas igualmente intensas em condições fotométricas especificadas, e sendo λ_m escolhido de modo que o valor máximo dessa razão seja 1 λ_m é o comprimento de onda que produz a sensação luminosa mais intensa ($\lambda_m = 550$ nm – visão fotópica).

Diagrama de Cromaticidade – CIE XYZ

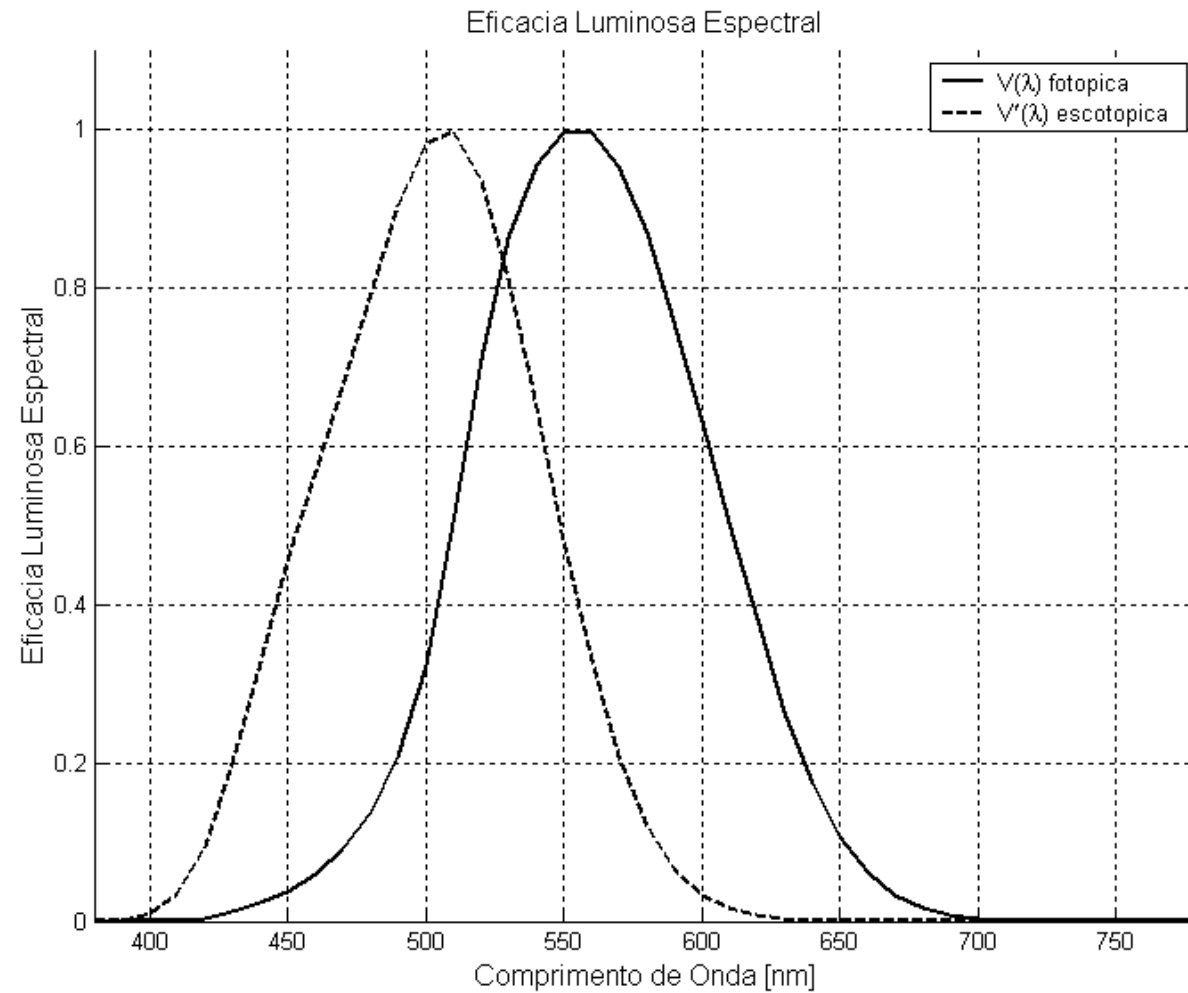


Diagrama de Cromaticidade – CIE XYZ

- As curvas de eficácia luminosa foram levantadas por procedimento de igualação de intensidade.
- Eficácia luminosa é uma medida da sensibilidade de percepção da intensidade (claro/escuro) da luz em função do comprimento de onda.
- Ou seja, mantida a mesma potência, determinado estímulo, por exemplo de 550 nm (amarelo), é percebido como mais claro que um estímulo de 450 nm (azul).

Diagrama de Cromaticidade – CIE XYZ

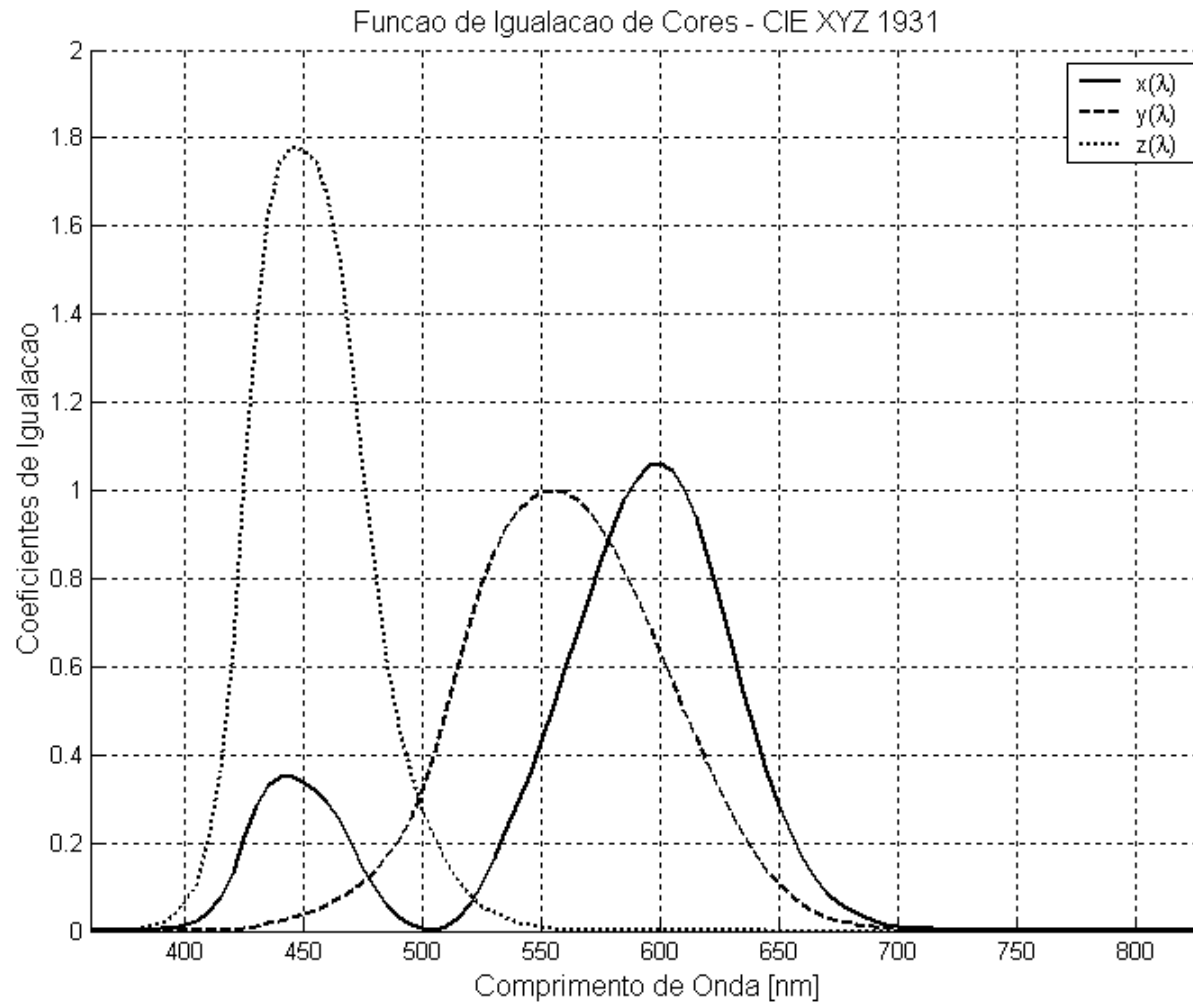


Diagrama de Cromaticidade – CIE XYZ

- Y é denominado **Luminância** e reflete a Eficácia Luminosa Espectral (fotópica) e está, portanto, associado à percepção de claro/escuro.
- X e Z estão associados a informações cromaticidade (matiz e saturação).

Diagrama de Cromaticidade – CIE XYZ

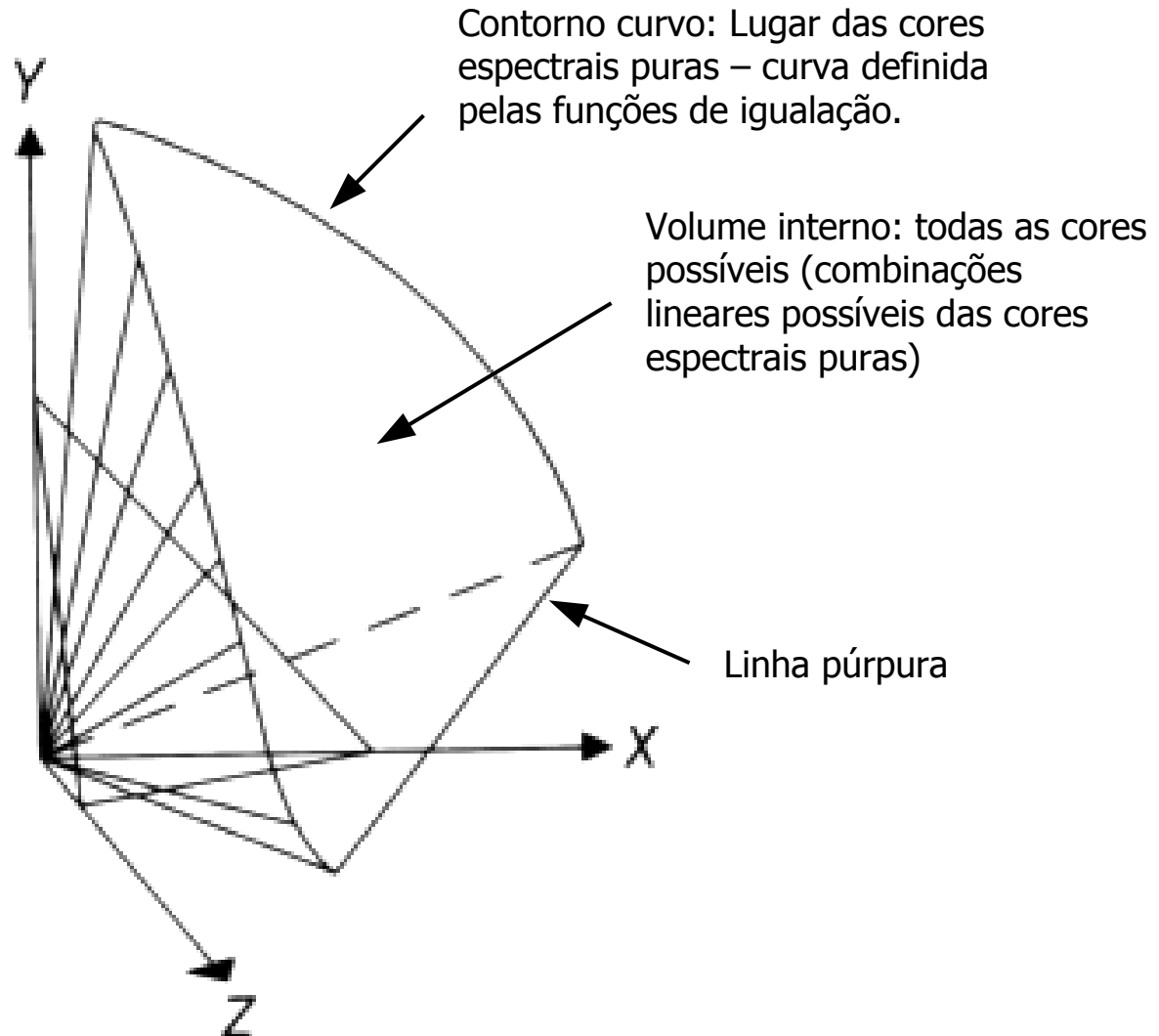


Diagrama de Cromaticidade – CIE XYZ

- Interseção com plano unitário: $X+Y+Z = 1$

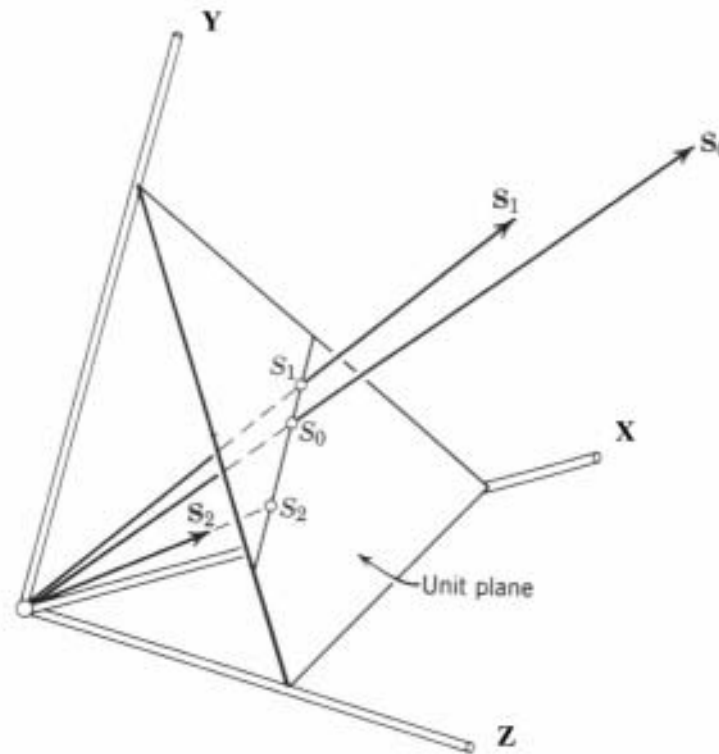


Diagrama de Cromaticidade – CIE XYZ

- Diagrama de Cromaticidade: projeção (ortográfica) do plano unitário no plano XY

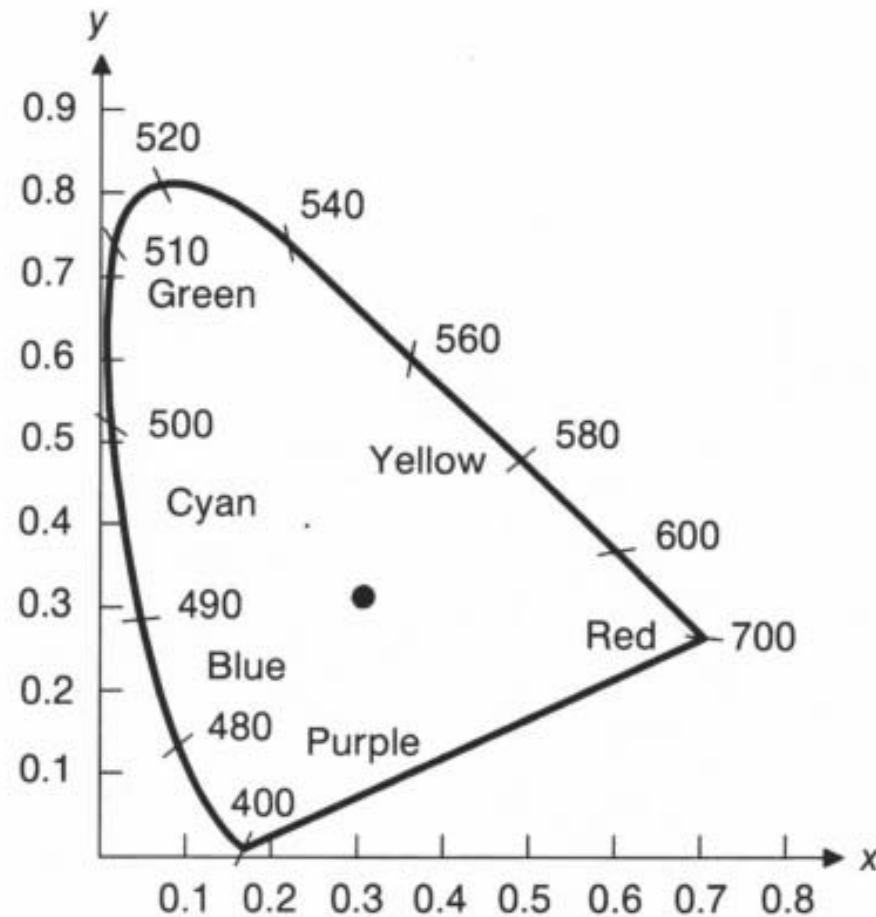


Diagrama de Cromaticidade – CIE XYZ

- Utilizando as primárias XYZ, uma cor é dada por

$$\bar{C} = X\bar{X} + Y\bar{Y} + Z\bar{Z}$$

- Coordenadas de cromaticidade xyz (interseção com plano $X+Y+Z=1$):

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

$$x + y + z = 1$$

Diagrama de Cromaticidade – CIE XYZ

- Cor é especificada pela tripla (x, y, Y) , onde:
 - (x, y) são as coordenadas de cromaticidade (estão relacionadas à matiz e saturação)
 - Y é a luminância (está associada à luminosidade/brilho – percepção de claro e escuro).
- Os valores dos estímulos primário XYZ da cor (x, y, Y) são

$$X = x \frac{Y}{y} \quad Y = Y \quad Z = (1 - x - y) \frac{Y}{y}$$

Diagrama de Cromaticidade – CIE XYZ

- Um ponto (x, y) no diagrama de cromaticidade está associado a um conjunto de cores que diferem apenas pela luminância.
- Ou, de outra forma, um conjunto de cores que diferem apenas por um fator de escala α (vetores colineares) possuem as seguintes coordenadas de cromaticidade e luminância $(x, y, \alpha Y)$, pois

$$\bar{C} = X\bar{X} + Y\bar{Y} + Z\bar{Z} = X\bar{X} + Y\bar{Y} + Z\bar{Z}$$

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

$$Y = Y$$

$$\bar{C}_\alpha = \alpha \bar{C}$$

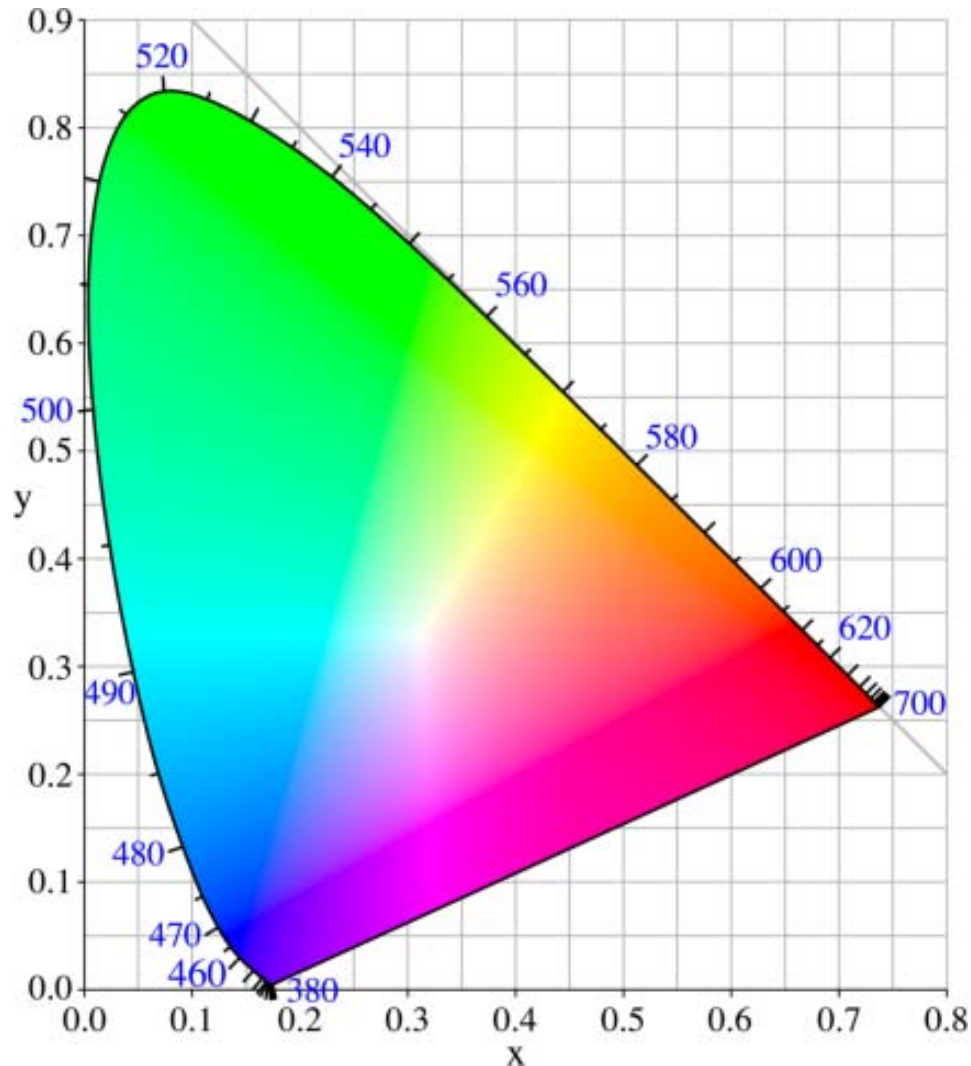
$$\bar{C}_\alpha = \alpha (X\bar{X} + Y\bar{Y} + Z\bar{Z}) = \alpha X\bar{X} + \alpha Y\bar{Y} + \alpha Z\bar{Z}$$

$$x_\alpha = \frac{\alpha X}{\alpha X + \alpha Y + \alpha Z} = \frac{X}{X+Y+Z} = x$$

$$y_\alpha = \frac{\alpha Y}{\alpha X + \alpha Y + \alpha Z} = \frac{Y}{X+Y+Z} = y$$

$$Y_\alpha = \alpha Y$$

Diagrama de Cromaticidade – CIE XYZ



Contorno curvo: cores espectrais puras.

Linha púrpura (linha reta do diagrama) tem lugar pela combinação linear das cores vermelho e azul

Diagrama de Cromaticidade CIE–XYZ

- Exercício
 - Quais as coordenadas de cromaticidade e luminância da mistura aditiva em igual proporção das seguintes cores, especificadas em coordenadas de cromaticidade e luminância:

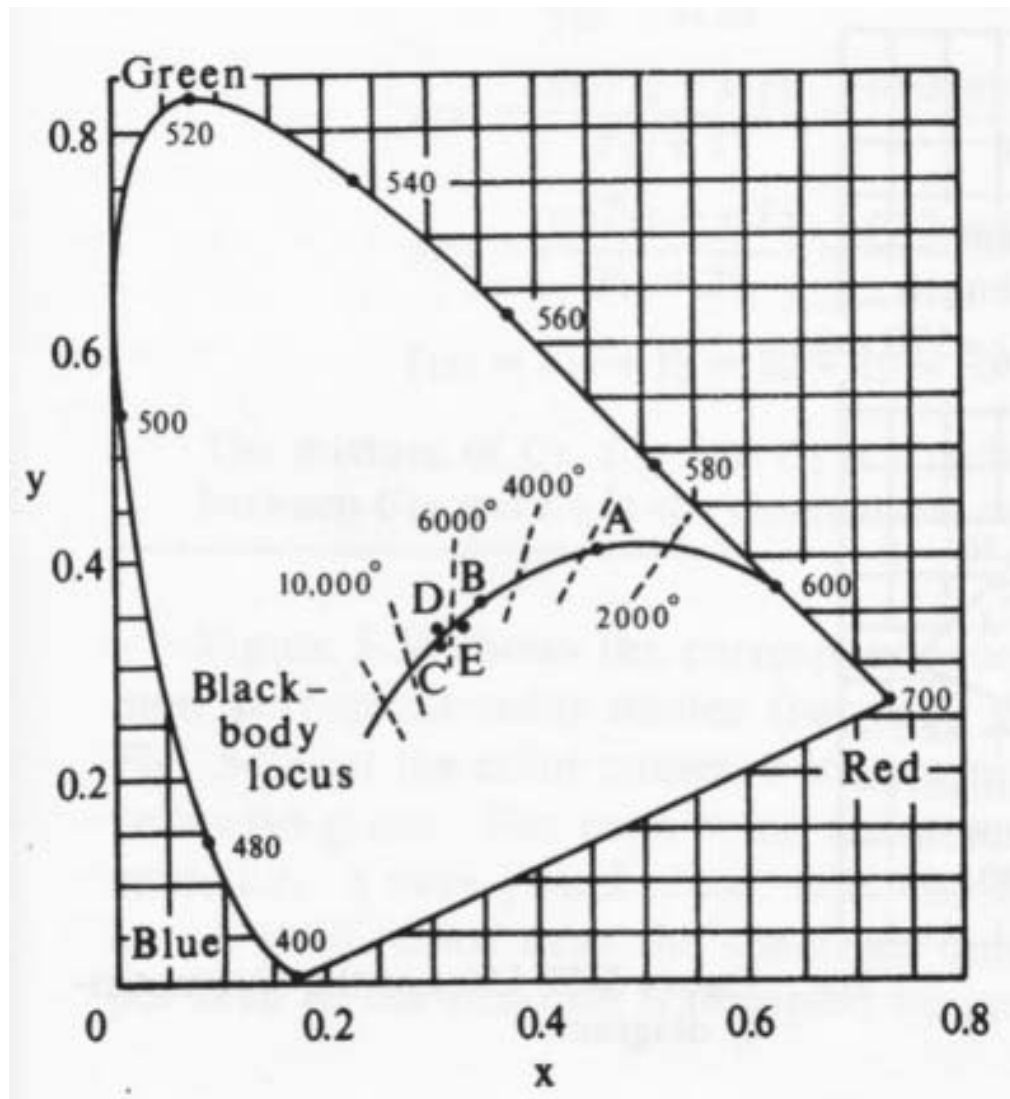
$$(x_1; y_1; Y_1)$$

$$(x_2; y_2; Y_2)$$

Iluminantes CIE–XYZ

- O padrão CIE-XYZ define ainda um conjunto de brancos:
 - Iluminante A (0,448; 0,408) - lâmpada de tungstênio (avermelhado);
 - Iluminante B (0,349; 0,3452) - luz solar direta ao meio dia;
 - Iluminante C (0,310; 0,316) - luz solar difusa de um céu nublado ao meio dia (padrão NTSC);
 - Iluminante E (0,333; 0,333) – energia constante em toda faixa do espectro (energia igual);
 - Iluminante D6500 (0,313; 0,329) - radiação de um corpo negro 6500° K (padrão SMPTE);

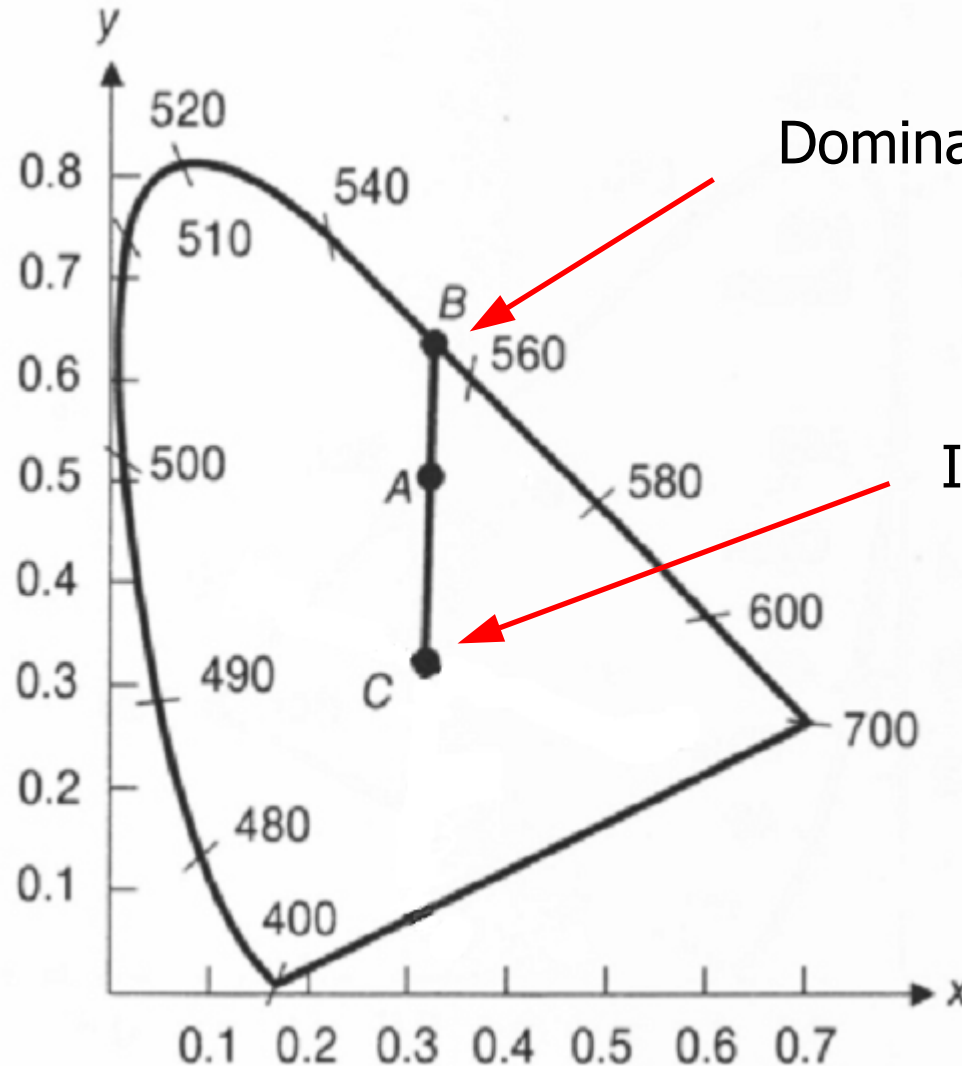
Iluminantes CIE-XYZ



Utilização do Diagrama

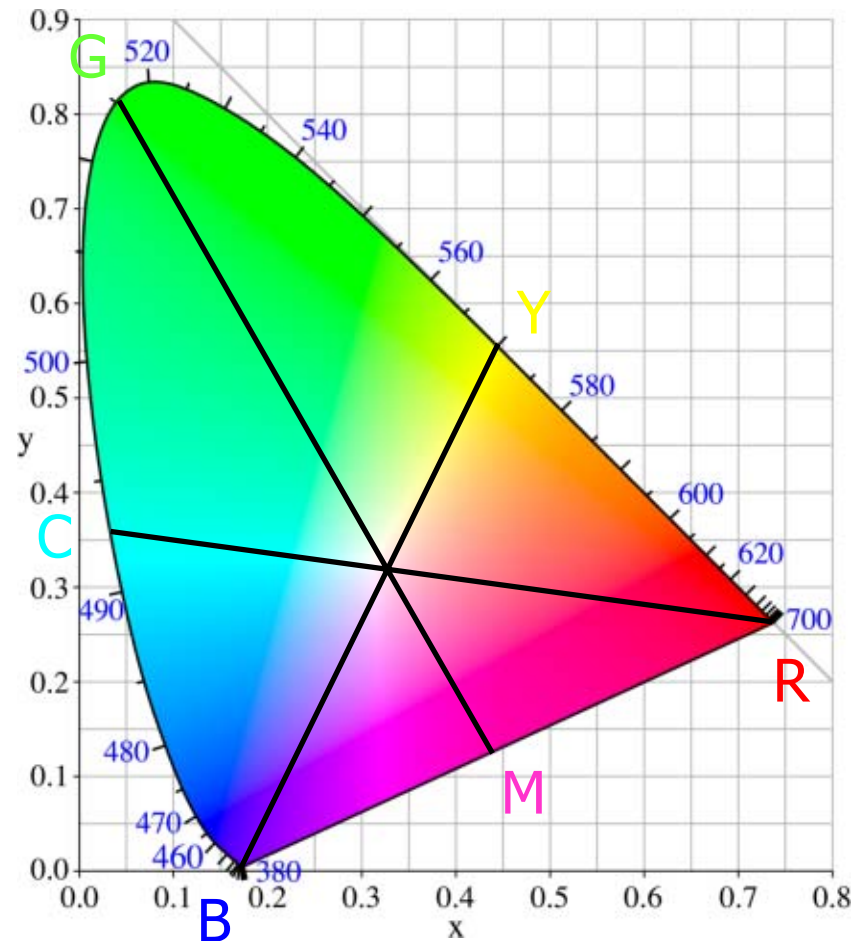
- **Comprimento de onda dominante** (hue): Considere uma cor A localizada no diagrama de cromaticidade em algum ponto do segmento de reta que une o branco de referência a uma cor espectral pura B. Como a cor A pode ser considerada como uma combinação do branco com a cor espectral pura B, o comprimento de onda de B é o comprimento de onda dominante da cor A.
- **Pureza** (saturação): A pureza de uma cor é expressa razão entre a distância da cor e o branco e dividido pela distância entre a cor dominante e o branco.

Utilização do Diagrama



Utilização do Diagrama

- **Cores complementares:** 2 cores que ao serem combinadas podem produzir o branco (de referência).

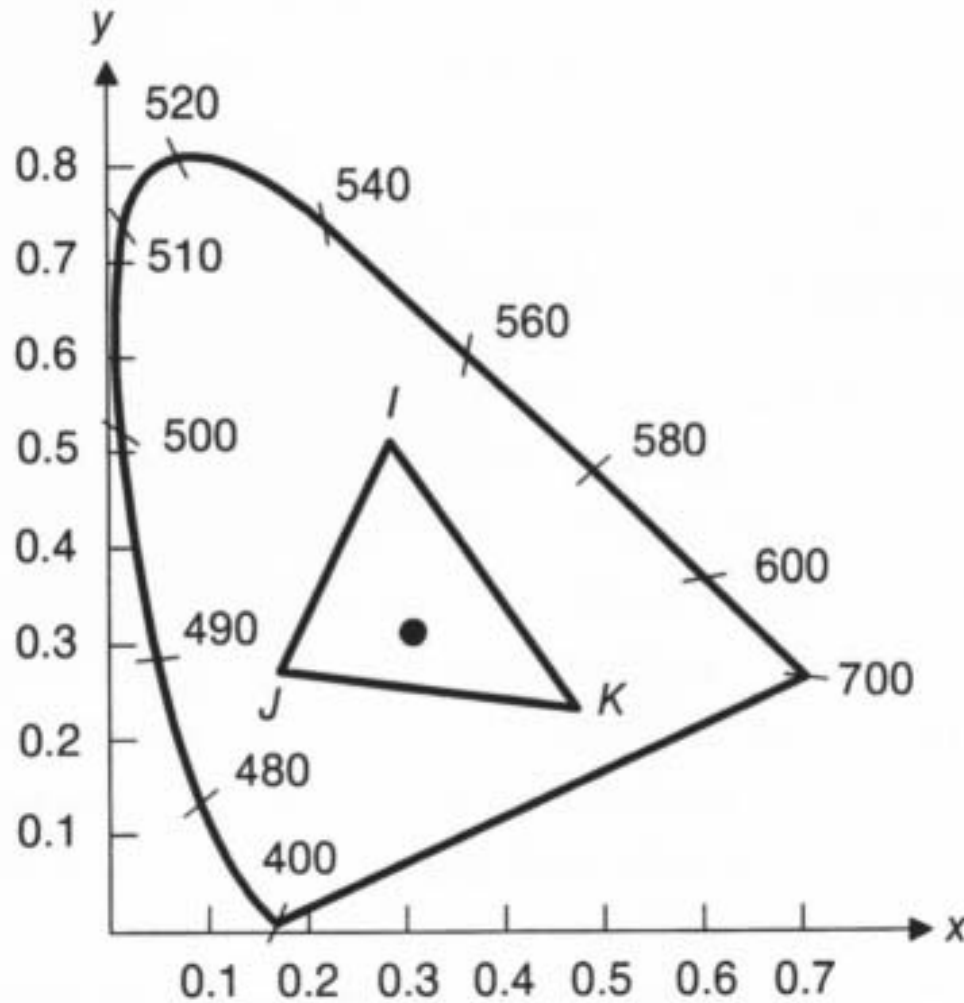


Red	Cyan
Green	Magent
Blue	Yellow

Utilização do Diagrama

- **Gama de cores de dispositivos/processos:** Dadas as coordenadas de cromaticidade das cores primitivas de um dispositivo de apresentação/reprodução de imagens, a gama de cores que o dispositivo consegue reproduzir é definida pela área no diagrama de cromaticidade definido pelo polígono (em geral, triângulo) cujos vértices são definidos pelas coordenadas das cores primitivas.

Utilização do Diagrama



Transformação entre espaços de cores

- A transformação entre os espaços de cores RGB (típicos dos monitores de vídeo) para o XYZ é dado por:

$$\bar{\mathbf{R}} = X_r \bar{\mathbf{X}} + Y_r \bar{\mathbf{Y}} + Z_r \bar{\mathbf{Z}}$$

$$\bar{\mathbf{G}} = X_g \bar{\mathbf{X}} + Y_g \bar{\mathbf{Y}} + Z_g \bar{\mathbf{Z}}$$

$$\bar{\mathbf{B}} = X_b \bar{\mathbf{X}} + Y_b \bar{\mathbf{Y}} + Z_b \bar{\mathbf{Z}}$$

$$\bar{\mathbf{C}} = X \bar{\mathbf{X}} + Y \bar{\mathbf{Y}} + Z \bar{\mathbf{Z}} = R \bar{\mathbf{R}} + G \bar{\mathbf{G}} + B \bar{\mathbf{B}}$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad \text{ou}$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad \text{com } \mathbf{T} = \begin{bmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{bmatrix}$$

Transformação entre espaços de cores

- Exercício
 - Considere um monitor de vídeo colorido da tecnologia CRT com coordenadas de cromaticidade $(x_r; y_r)$ $(x_g; y_g)$ $(x_b; y_b)$ para os fósforos vermelho, verde e azul. Qual a matriz para converter cores produzidas no espaço RGB do monitor para o espaço CIE-XYZ?

Transformação entre espaços de cores

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r C_r & x_g C_g & x_b C_b \\ y_r C_r & y_g C_g & y_b C_b \\ (1 - x_r - y_r) C_r & (1 - x_g - y_g) C_g & (1 - x_b - y_b) C_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

$$C_r = \frac{Y_r}{y_r} \quad C_g = \frac{Y_g}{y_g} \quad C_b = \frac{Y_b}{y_b}$$

- C_r , C_g e C_b são desconhecidas.
- Para o cálculo de C_r , C_g e C_b utiliza-se o branco de calibração. Mede-se o valor X_w , Y_w , Z_w para a situação $R=G=B=1$ (valor máximo igual em todas as componentes = branco)

Transformação entre espaços de cores

- Com a definição do branco de calibração, calcula-se os valores C_r , C_g e C_b através de

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ (1-x_r-y_r) & (1-x_g-y_g) & (1-x_b-y_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_r \\ C_g \\ C_b \end{bmatrix}$$

- O resultado é:

$$C_r = \left(\frac{Y_w}{Y_r} \right) \frac{[x_w(y_g - y_b) - y_w(x_g - x_b) + x_g y_b - x_b y_g]}{D}$$

$$C_g = \left(\frac{Y_w}{Y_r} \right) \frac{[x_w(y_b - y_r) - y_w(x_b - x_r) + x_b y_r - x_r y_b]}{D}$$

$$C_b = \left(\frac{Y_w}{Y_r} \right) \frac{[x_w(y_r - y_g) - y_w(x_r - x_g) + x_r y_g - x_g y_r]}{D}$$

$$D = x_r(y_g - y_b) + x_g(y_b - y_r) + x_b(y_r - y_g)$$

Transformação entre espaços de cores

- Exercício
 - No padrão NTSC as cores dos fósforos vermelho, verde e azul (RGB) dos monitores são padronizadas tendo as seguintes coordenadas de cromaticidade

R (0,670; 0,330)

G (0,210; 0,710)

B (0,140; 0,080)

Branco de calibração: D_{6500} (0,313; 0,329)

(D_{6500} branco de calibração padrão SMPTE - Society of Motion Picture and Television Engineers).

Transformação entre espaços de cores

- Exercícios

- Qual a cor, em coordenadas de cromaticidade e luminância (x, y, Y) , que um monitor NTSC produz quando $(R; G; B) = (1; 0; 0)$?
- Qual a cor, em coordenadas de cromaticidade e luminância (x, y, Y) , que um monitor NTSC produz quando $(R; G; B) = (0; 1; 0)$?
- Qual a cor, em coordenadas de cromaticidade e luminância (x, y, Y) , que um monitor NTSC produz quando $(R; G; B) = (0; 0; 1)$?
- Qual a cor, em coordenadas de cromaticidade e luminância (x, y, Y) , que um monitor NTSC produz quando $(R; G; B) = (1; 1; 0)$?
- Qual a cor, em coordenadas de cromaticidade e luminância (x, y, Y) , que um monitor NTSC produz quando $(R; G; B) = (1; 2; 1)$?

Transformação entre espaços de cores

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5893 & 0.1790 & 0.1831 \\ 0.2903 & 0.6051 & 0.1046 \\ 0.0000 & 0.0682 & 1.0200 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

R G B	x y Y
(1, 0, 0)	(0.670, 0.330, 0.290)
(0, 1, 0)	(0.210, 0.710, 0.605)
(0, 0, 1)	(0.140, 0.080, 0.105)
(1, 1, 0)	(0.444, 0.517, 0.895)
(1, 1, 1)	(0.313, 0.329, 1.000)

Transformação entre espaços de cores

- Calcule os valores dos estímulos RGB de um monitor NTSC para que a cor $(x; y; Y) = (0,2; 0,3; 0,5)$ seja apresentada no monitor. Considere que o branco de calibração é produzido quando $(R; G; B) = (1; 1; 1)$ e que o branco é produzido com luminância unitária ($Y=1$).
- Calcule os valores dos estímulos RGB de um monitor NTSC para que a cor $(x; y; Y) = (0,2; 0,3; 1)$ seja apresentada no monitor. Considere que o branco de calibração é produzido quando $(R; G; B) = (1; 1; 1)$ e que o branco é produzido com luminância unitária ($Y=1$).
O que significa uma das componentes RGB maior que 1?
- Calcule os valores dos estímulos RGB do monitor NTSC para que a cor $(x; y; Y) = (0,6; 0,6; 0,5)$ seja apresentada no monitor. Considere que o branco de calibração é produzido quando $(R; G; B) = (1; 1; 1)$ e que o branco é produzido com luminância unitária ($Y=1$).
O que significa uma das componentes RGB negativa?

Transformação entre espaços de cores

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.9670 & -0.5483 & -0.2968 \\ -0.9545 & 1.9380 & -0.0274 \\ 0.0638 & -0.1296 & 0.9823 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

x y Y	R G B
(0.2, 0.3, 0.5)	(0.1341, 0.6279, 0.7750)
(0.2, 0.3, 1)	(0.2683, 1.2559, 1.5501)
(0.6, 0.6, 0.5)	(0.7588, 0.4963, -0.1966)

Transformação entre espaços de cores

- Exercício
 - Como é possível converter cores especificadas em RGB em tons de cinza? Ou seja, quais os valores de a , b , e c da transformação abaixo, sendo C uma tonalidade de cinza.

$$C = \begin{bmatrix} a & b & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Transformação entre espaços de cores

- Sistema aditivo RGB (tela preta) e Sistema subtrativo CMY (papel branco).



RGB e CMY

- Relações entre RGB e CMY

$$C = W - R$$

$$M = W - B$$

$$Y = W - G$$

$$W = (R + G + B)$$

$$C = (R + G + B) - R = G + B$$

$$M = (R + G + B) - G = R + B$$

$$Y = (R + G + B) - B = R + G$$

$$R = W - C$$

$$B = W - M$$

$$G = W - Y$$

$$K = (C + M + Y)$$

$$W = (R + G + B)$$

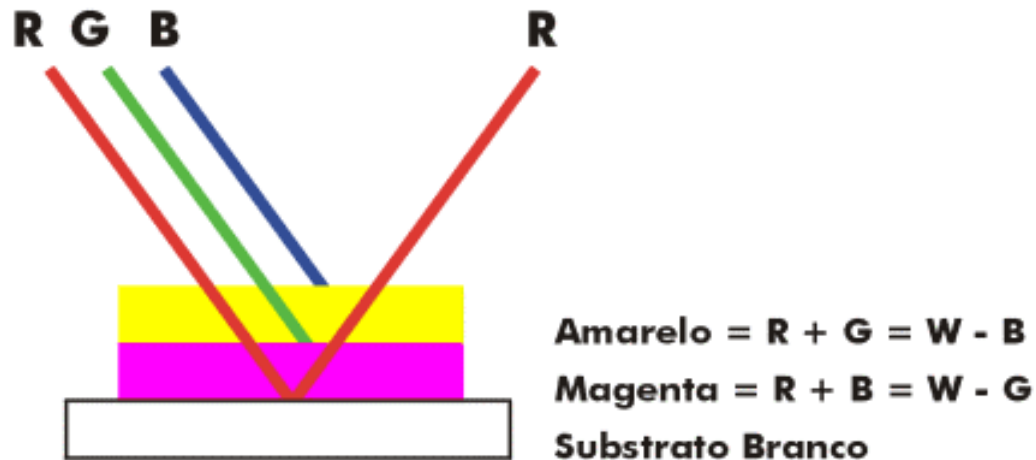
$$R = W + K - C = W + (C + M + Y) - C = W + (M + Y)$$

$$G = W + K - M = W + (C + M + Y) - M = W + (C + Y)$$

$$B = W + K - Y = W + (C + M + Y) - Y = W + (C + M)$$

RGB e CMY

- Relação RGB/CMY - reprodução por impressão em substrato branco - processo de filtragem

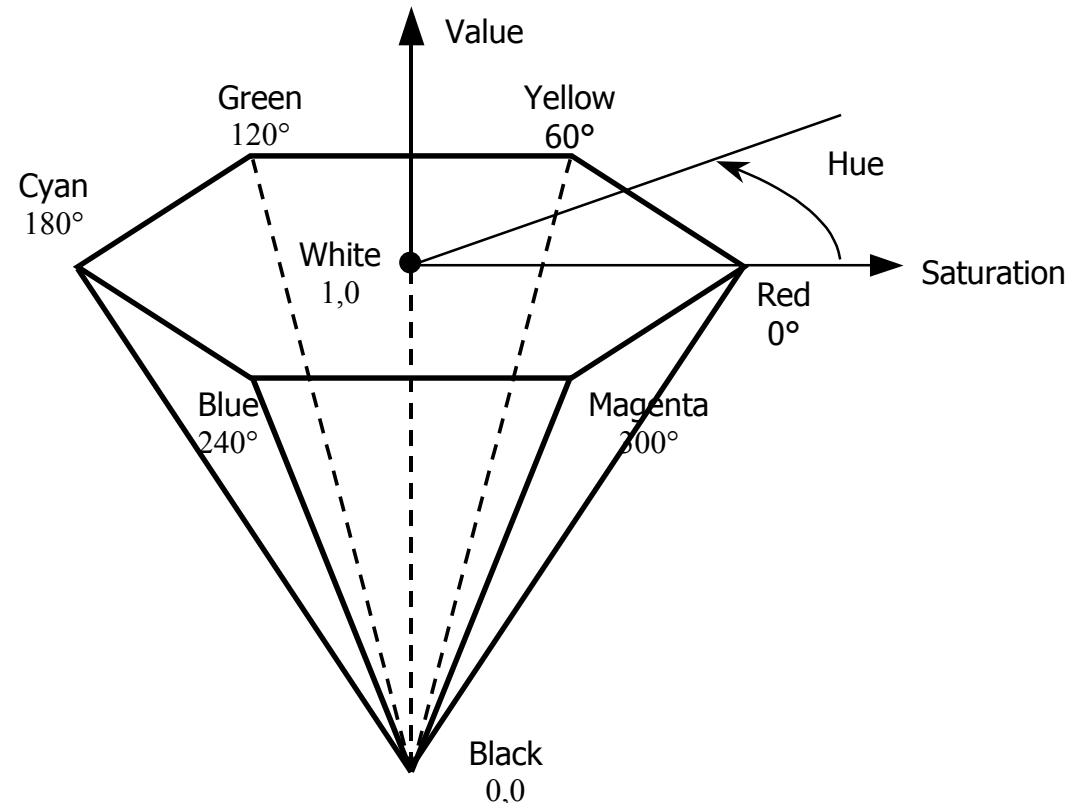
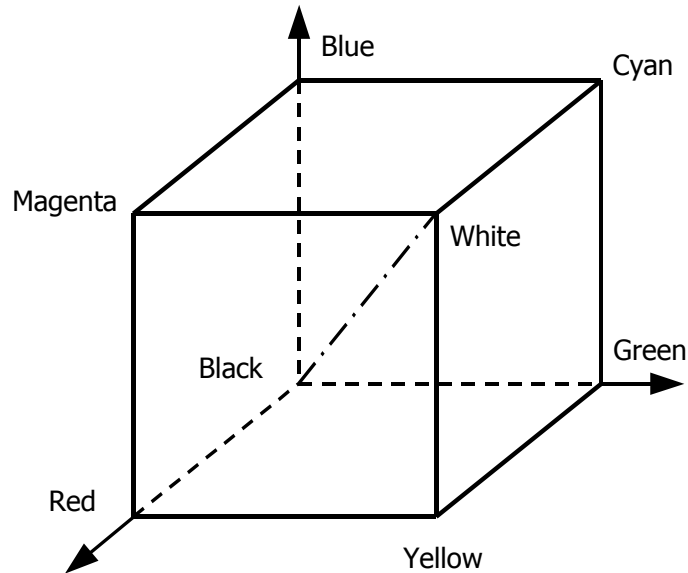


RGB e CMY

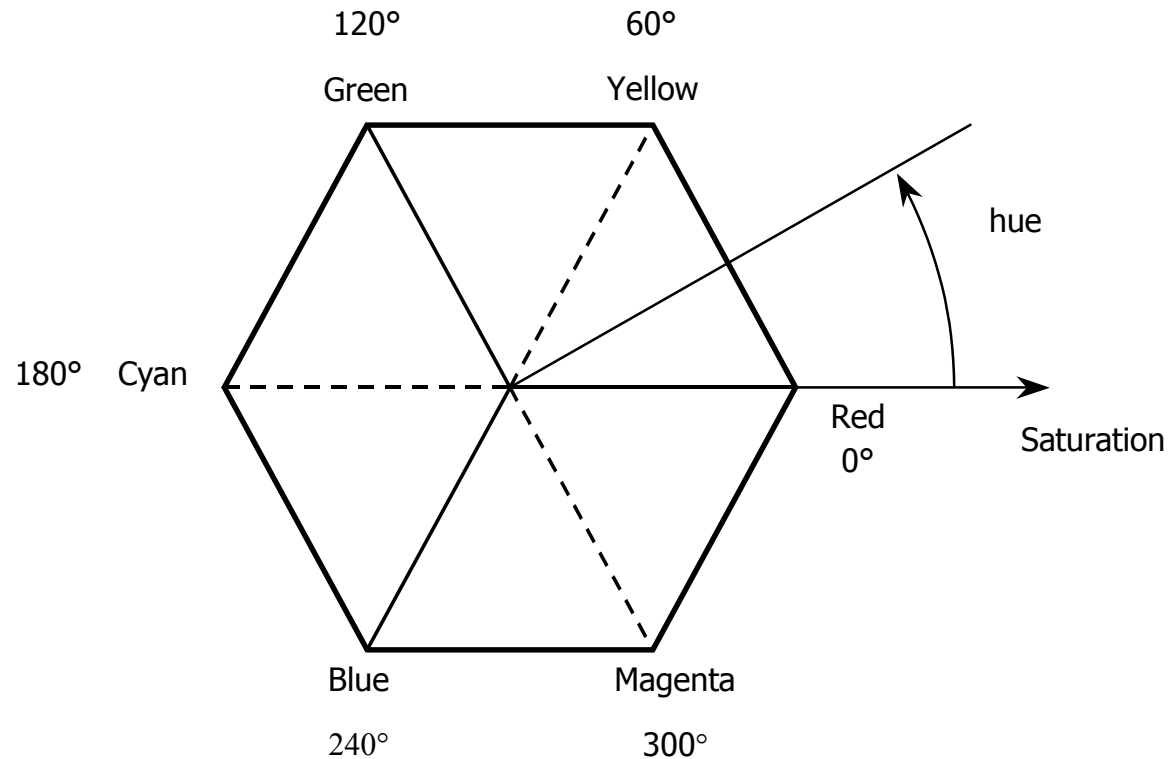
- Na prática para a impressão utiliza-se CMYK (K = black - preto)
 - Melhorar a reprodução do preto, melhorando contraste
 - Economia de tinta
 - Menor tempo de secagem
- Duas técnicas de impressão
 - Superposição de pigmento (como apresentado)
 - Composição espacial



Modelo de cor HSV (Hue, Saturation, Value)



Modelo de cor HSV (Hue, Saturation, Value)



- Hue (matiz) medido em graus $[0^\circ, 360^\circ]$
- Saturation (saturação) $[0.0, 1.0]$
- Value (valor) $[0.0, 1.0]$

Transformação de RGB para HSV

```
// Entrada: h [0,360], s [0,1] e v [0,1]
// Saída: r, g e b [0,1]

if ( s == 0 )
    if ( h = UNDEFINED )
        r = g = b = v;
    else
        ERROR;
else {
    if ( h = 360 )
        h = 0;
    h = h / 60;
    i = Floor( h );
    f = h - i;
    p = v * ( 1 - s );
    q = v * ( 1 - ( s * f ) );
    t = v * ( 1 - ( s * ( 1 - f ) ) );
```

Transformação de RGB para HSV

```
switch ( i ) {  
  
    case 0:  
        r = v; g = t; b = p;  
        break;  
    case 1:  
        r = q; g = v; b = p;  
        break;  
    case 2:  
        r = p; g = v; b = t;  
        break;  
    case 3:  
        r = p; g = q; b = v;  
        break;  
    case 4:  
        r = t; g = p; b = v;  
        break;  
    case 5:  
        r = v; g = p; b = q;  
        break;  
}  
}
```

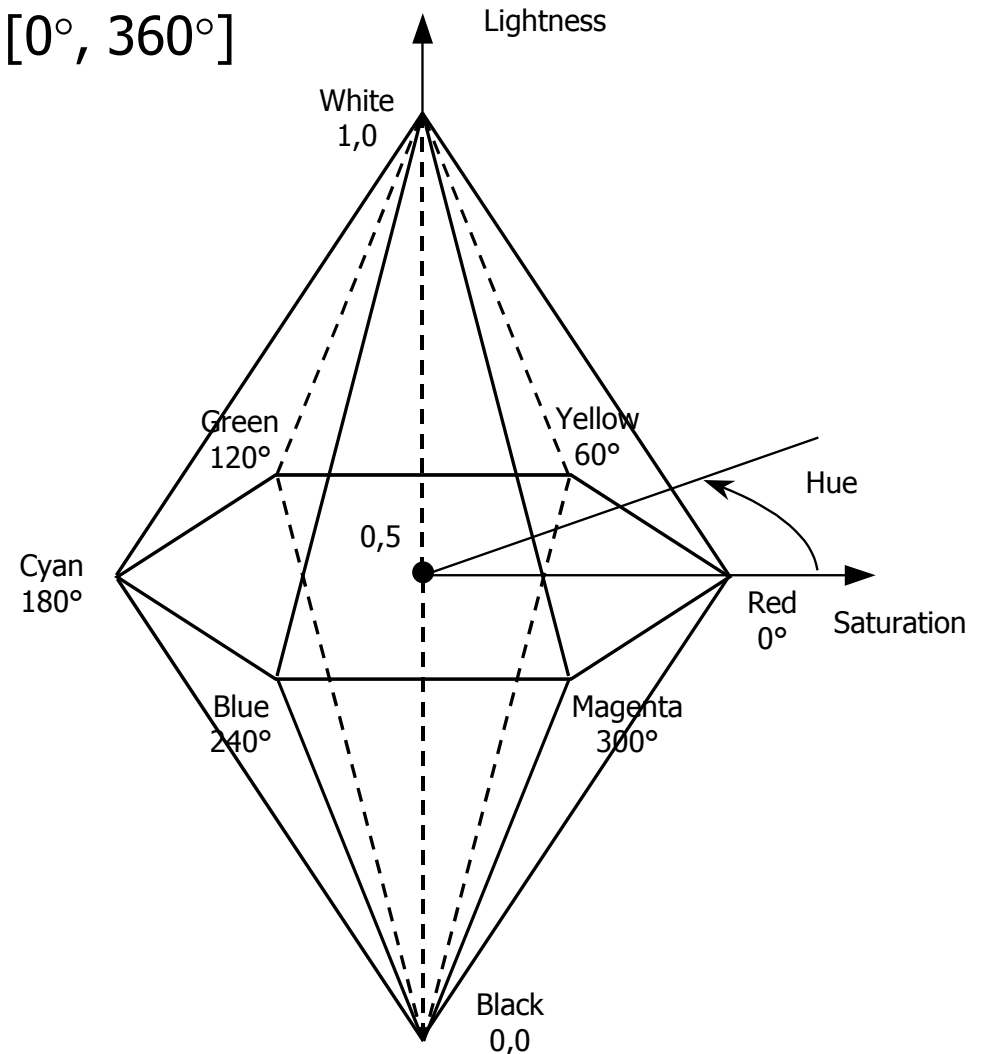
Transformação de HSV para RGB

```
// Entrada: r, g e b [0,1]
// Saída: h [0,360], s [0,1] e v [0,1]

max = MAX( r, g, b );
min = MIN( r, g, b );
v = max;
delta = max - min;
if ( max != 0 )
    s = delta / max;
else
    s = 0;
if ( s == 0 )
    h = UNDEFINED;
else {
    if ( r = max )
        h = 60 * ( g - b ) / delta;
    else if ( g = max )
        h = 120 + 60 * ( b - r ) / delta;
    else if ( b = max ) {
        h = 240 + 60 * ( r - g ) / delta;
        if ( h < 0 )
            h = h + 360;
    }
}
```

Modelo de cor HLS (Hue, Lightness, Saturation)

- Hue (matiz) medido em graus $[0^\circ, 360^\circ]$
- Lightness (brilho) $[0.0, 1.0]$
- Saturation (valor) $[0.0, 1.0]$



Transformação de RGB para HLS

```
// Entrada: r, g e b [0,1]
// Saída: h [0,360], l [0,1] e s [0,1]

max = MAX( r, g, b );
min = MIN( r, g, b );
delta = max - min;
l = ( max + min ) / 2;
if ( max == min ) {
    s = 0;
    h = UNDEFINED;
} else {
    if ( l <= 0.5 )
        s = delta / (max + min);
    else
        s = delta / (2 - max - min) ;
    if ( r == max )
        h = 60 * ( g - b ) / delta;
    else if ( g == max )
        h = 120 + 60 * ( b - r ) / delta;
    else if ( b == max ) {
        h = 240 + 60 * ( r - g ) / delta;
    }
    if ( h < 0 )
        h = h + 360;
}
```

Transformação de HLS para RGB

```
// Entrada: r, g e b [0,1]
// Saída: h [0,360], l [0,1] e s [0,1]

if ( l <= 0.5)
    m2 = l * ( 1 + s );
else
    m2 = l + s - l * s ;
m1 = 2 * l - m2;
if( s == 0 )
    if( h == UNDEFINED )
        r = g = b = l;
    else
        ERROR;
else {
    r = value( m1, m2, h + 120 );
    g = value( m1, m2, h );
    b = value( m1, m2, h - 120 );
}
```

Transformação de HLS para RGB

```
double value( double n1, double n2, double hue){  
  
    if( hue > 360 )  
        hue = hue - 360;  
    else if( hue < 0 )  
        hue = hue + 360;  
    if( hue < 60 )  
        val = n1 + ( n2 - n1 ) * hue / 60;  
    else if( hue < 180 )  
        val = n2;  
    else if( hue < 240 )  
        val = n1 + (n2 - n1) * (240 - hue) / 60;  
    else  
        val = n1;  
  
    return val;  
}
```