

## Aula – Computação Gráfica

---

### Modelos de Cor Luz, Percepção e Tri-Estímulo

Slides para uso pessoal e exclusivo durante o período de aula. Distribuição ou qualquer uso fora do escopo da disciplina é expressamente proibido.

1

1

#### Visão Geral

---

- Introdução
- Interação do Fóton de Luz com Objetos
- O Olho Humano
- Percepção Visual Humana
- Luz Visível
- Teoria do Tri-Estímulo

2

2

#### Introdução

---

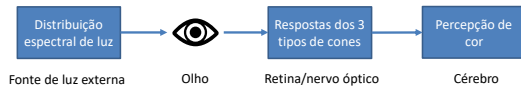
- Luz
  - Ondas eletromagnéticas
- Fontes luminosas
  - Emitem ondas eletromagnéticas que interagem com o mundo
- Pessoas enxergam ondas capturadas pelos olhos

3

3

## Introdução

- Espectro visível
  - Comprimento de onda entre 400nm e 700nm
- Pessoas percebem luz com comprimento de onda
  - 400nm como “azul”
  - 700nm como “vermelho”



4

4

## Introdução

- Ver é um processo bidirecional
  - O processo visual é direcionado semanticamente
  - Esperamos ver certas coisas, ou não, baseado no contexto

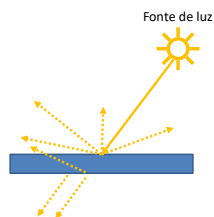
<https://www.youtube.com/watch?v=Ahg6qcgoay4>

5

5

## Interação do Fóton de Luz com Objetos

- Absorção
- Difusão
- Reflexão
- Transparência
- Refração
- Fluorescência
- Dispersão sub-superficial
- Fosforescência
- Inter-reflexão

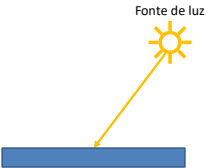


6

6

Interação do Fóton de Luz com Objetos

- **Absorção**
- Difusão
- Reflexão
- Transparência
- Refração
- Fluorescência
- Dispersão sub-superficial
- Fosforescência
- Inter-reflexão



7

7

---

---

---

---

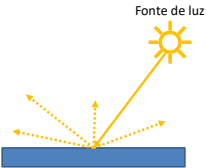
---

---

---

Interação do Fóton de Luz com Objetos

- Absorção
- **Reflexão Difusa**
- Reflexão
- Transparência
- Refração
- Fluorescência
- Dispersão sub-superficial
- Fosforescência
- Inter-reflexão



8

8

---

---

---

---

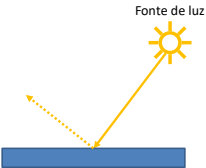
---

---

---

Interação do Fóton de Luz com Objetos

- Absorção
- Difusão
- **Reflexão Especular**
- Transparência
- Refração
- Fluorescência
- Dispersão sub-superficial
- Fosforescência
- Inter-reflexão



9

9

---

---

---

---

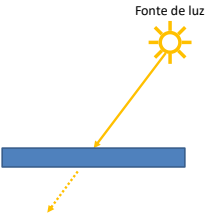
---

---

---

Interação do Fóton de Luz com Objetos

- Absorção
- Difusão
- Reflexão
- **Transparência**
- Refração
- Fluorescência
- Dispersão sub-superficial
- Fosforescência
- Inter-reflexão



10

10

---

---

---

---

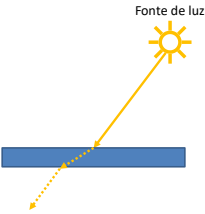
---

---

---

Interação do Fóton de Luz com Objetos

- Absorção
- Difusão
- Reflexão
- Transparência
- **Refração**
- Fluorescência
- Dispersão sub-superficial
- Fosforescência
- Inter-reflexão



11

11

---

---

---

---

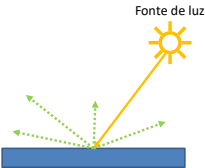
---

---

---

Interação do Fóton de Luz com Objetos

- Absorção
- Difusão
- Reflexão
- Transparência
- Refração
- **Fluorescence**
- Dispersão sub-superficial
- Fosforescência
- Inter-reflexão



12

12

---

---

---

---

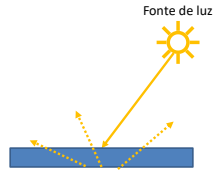
---

---

---

### Interação do Fóton de Luz com Objetos

- Absorção
- Difusão
- Reflexão
- Transparência
- Refração
- Fluorescência
- **Dispersão sub-superficial**
- Fosforescência
- Inter-reflexão

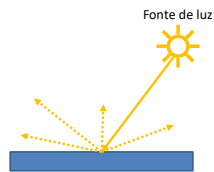


13

13

### Interação do Fóton de Luz com Objetos

- Absorção
- Difusão
- Reflexão
- Transparência
- Refração
- Fluorescência
- Dispersão sub-superficial
- **Fosforescência**
- Inter-reflexão

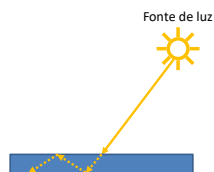


14

14

### Interação do Fóton de Luz com Objetos

- Absorção
- Difusão
- Reflexão
- Transparência
- Refração
- Fluorescência
- Dispersão sub-superficial
- Fosforescência
- **Inter-reflexão**

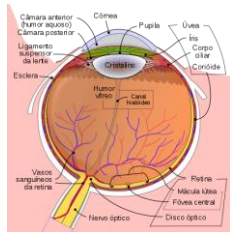


15

15

## O Olho Humano

- Funciona como uma câmara
  - Íris: parte colorida com músculos radiais
  - Pupila: abertura por onde entra a luz
  - Retina: constituída por células foto-receptoras



Rhcastilhos, And Jmarcho.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic\\_diagram\\_of\\_the\\_human\\_eye\\_pt.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic_diagram_of_the_human_eye_pt.svg)  
 CC BY-SA 3.0

16

16

## O Olho Humano

- A retina

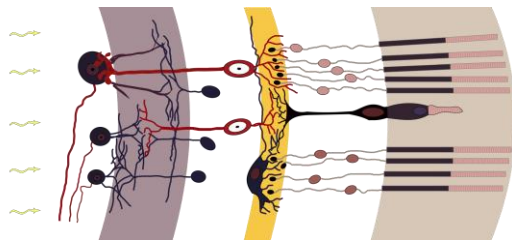


Fig:retina.png: Ramón y Cajal  
 derivative work: Fig:retina.banded.png: Anka Friedrich (talk)  
 derivative work: vectorisation by chris 38  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Retina-diagram.svg>  
 CC BY-SA 3.0

17

17

## O Olho Humano

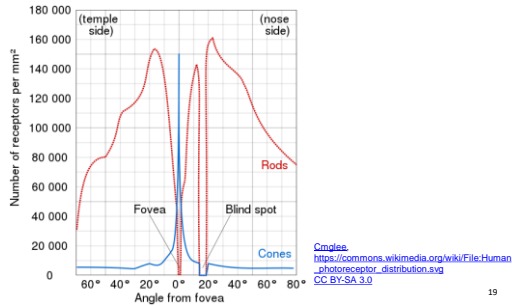
- A retina é composta por dois tipos de receptores de luz
  - Cones (Cones)
    - Formato de cone
    - Menos sensível
    - Opera com muita luz
    - Permite percepção de cores
  - Bastonetes (Rods)
    - Formato de bastão
    - Altamente sensível
    - Opera a noite
    - Visão preto e branco

18

18

## O Olho Humano

- Por que vemos mais estrelas na periferia da visão?



19

## Percepção Visual Humana

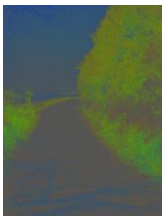
- Contraste
  - Medida de capacidade dos humanos de perceber diferenças em luminância



20

## Percepção Visual Humana

- Luminância x Cromaticidade
  - Se você tivesse que escolher, com qual você ficaria para assistir um filme?



Somente cor com intensidade constante



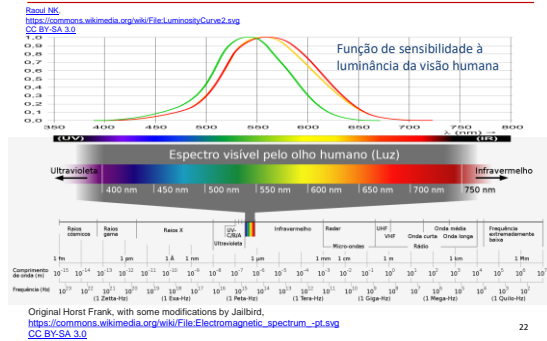
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elkhorn\\_Slough.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elkhorn_Slough.jpg)  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RGO\\_Chromaticity\\_Example.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RGO_Chromaticity_Example.png)  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Image\\_without\\_chromaticity.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Image_without_chromaticity.png)  
CC BY-SA 3.0



Somente intensidade com cor constante

21

## Percepção Visual Humana



22

22

## Percepção Visual Humana

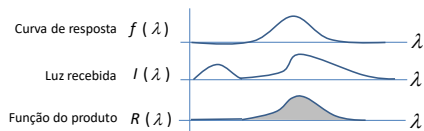
- Termos da percepção
  - 1: Matiz (Hue)
  - 2: Saturação
  - 3: Luminosidade
  - 4: Brilho
- Termos da colorimetria (mensurável com espectro-radiômetro)
  - 1: Comprimento de onda dominante
  - 2: Pureza da excitação
  - 3: Luminância
  - 4: Luminância

23

23

## Percepção Visual Humana

- Resposta a um estímulo de luz



- Área cinza representa o quanto o receptor vê

$$\text{Receptor} = \int R(\lambda) d\lambda = \int I(\lambda) f(\lambda) d\lambda$$

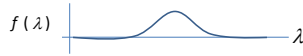
24

24

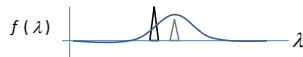


## Percepção Visual Humana

- Metamerismo
  - Imagine que possamos criar um receptor com a curva de resposta abaixo:



- Como ele responderia a essas fontes luminosas?



- Seriam percebido da mesma forma (Metamerismo)

25

25

## Luz Visível

- Processo de formação de cores com as primárias

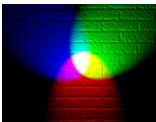
- A: Subtrativo

- Ocorre na
  - Mistura de tintas
  - Uso de filtros coloridos transparentes



- B: Aditivo

- Ocorre na
  - Mistura de luzes de fontes diferentes
  - Luzes passando por dois filtros diferentes



Bb3con;  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RGB\\_illumination.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RGB_illumination.jpg)  
 CC BY-SA 3.0

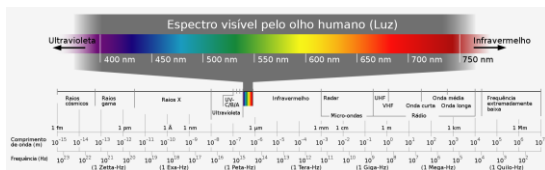
26

26

## Luz Visível

- Por que vemos esses comprimentos de onda?

...porque é onde a luz  
do sol irradia energia  
eletromagnética



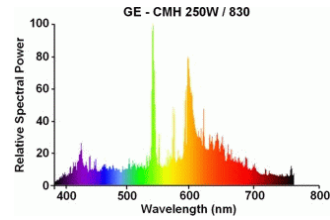
Original Horst Frank, with some modifications by Jailbird.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic\\_spectrum\\_pt.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum_pt.svg)  
 CC BY-SA 3.0

27

27

Luz Visível

- Luz pode ser descrita pelo seu espectro
  - Número de fótons por unidade de tempo para cada comprimento de onda



Philips Lighting.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MH-L.png>  
CC-BY-SA 2.5 pt

28

28

---

---

---

---

---

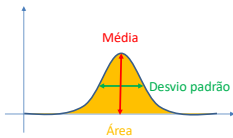
---

---

---

Luz Visível

- Não existe uma função simples para descrever todas as cores percebidas em todas as diferentes condições
- Para simplificar
  - Considere espectros com distribuição normal



29

29

---

---

---

---

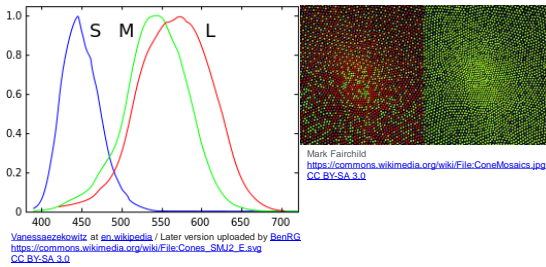
---

---

---

---

Luz Visível



Mark Fairchild  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ConeMosaics.jpg>  
CC-BY-SA 3.0

Varianisalekowitz et al. wikipedia / Later version uploaded by BenRG  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cones\\_SMJ2\\_E.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cones_SMJ2_E.png)  
CC-BY-SA 3.0

30

30

---

---

---

---

---

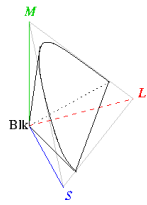
---

---

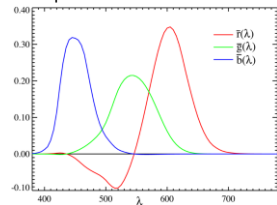
---

## Teoria do Tri-Estímulo

- Qualquer cor pode ser atingida usando três cores primárias
  - Porém, pode precisar de valores negativos
  - Não existe negativo para luz
- Portanto, RGB não é suficiente para todas as cores visíveis



[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gamut\\_tul.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gamut_tul.png)  
CC BY-SA 3.0



[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIE1931\\_RGBCMF.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIE1931_RGBCMF.png)  
Public Domain

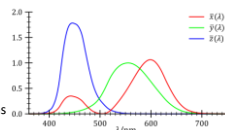
31

## Teoria do Tri-Estímulo

- Espaço de cores CIE (matemático)
  - Valores são positivos
  - Utiliza primárias matemáticas X, Y e Z
  - Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)
  - Y foi escolhida para representar a função de eficiência luminosa

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{linear} \\ G_{linear} \\ B_{linear} \end{bmatrix}$$

Transformação padrão para primárias desconhecidas



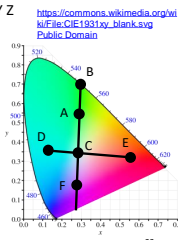
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIE\\_1931\\_XYZ\\_Color\\_Matching\\_Functions.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIE_1931_XYZ_Color_Matching_Functions.svg)  
CC BY-SA 4.0

32

32

## Teoria do Tri-Estímulo

- Vantagens do espaço de cores CIE X Z Y
  - Pode-se especificar qualquer cor com 3 variáveis
  - Muito conveniente!
    - Colorímetros e espectrômetros medem X Z Y
  - Usado em muitas áreas
    - Pintura, física, luzes, química, etc.
  - Permite definir cores complementares
    - Ex. A e F
  - Permite definir pureza da excitação
    - Ex. AC/BC
  - Permite definir gamuts de dispositivos

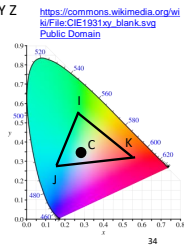


33

33

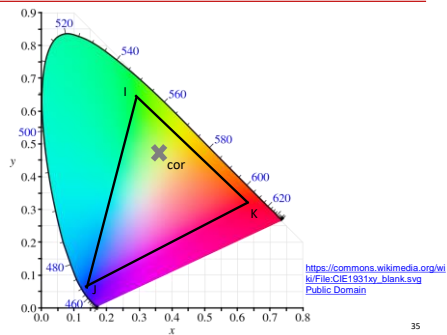
## Teoria do Tri-Estímulo

- Vantagens do espaço de cores CIE X Z Y
  - Pode-se especificar qualquer cor com 3 variáveis
  - Muito conveniente!
    - Colorímetros e espectrômetros medem X Y Z
  - Usado em muitas áreas
    - Pintura, física, luzes, química, etc.
  - Permite definir cores complementares
    - Ex. A e F
  - Permite definir pureza da excitação
    - Ex. AC/BC
  - Permite definir gamuts de dispositivos



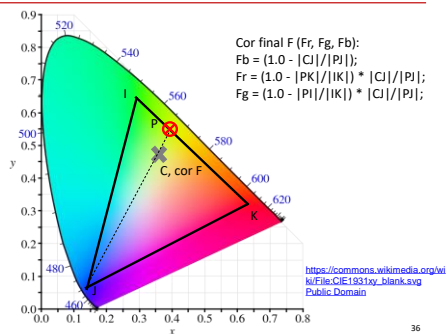
34

## Teoria do Tri-Estímulo



35

## Teoria do Tri-Estímulo



36

Perguntas ?????

37