

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Marcelo Gattass, pelas idéias e sugestões de como abordar os assuntos contidos nesta apostila e pela maioria das figuras.

O sistema gráfico no qual esta apostila se baseia, o *CanvasDraw* (CD), foi desenvolvido pelo TeCGraf (Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica) em convênio com o CENPES/PETROBRAS. A versão acadêmica deste sistema, distribuída sem custos, foi cedida pelo CENPES/PETROBRÁS e pela PUC-Rio.

# ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b>	<b>1</b>
<b>PREFÁCIO</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO A COMPUTAÇÃO GRÁFICA</b>	<b>4</b>
<b>CAPÍTULO 2 - LUZ E COR</b>	<b>6</b>
2.1 CONCEITOS BÁSICOS	6
2.2 PROCESSO DE FORMAÇÃO DE CORES	8
2.3 PERCEPÇÃO HUMANA	11
2.4 DIAGRAMA DE CROMATICIDADE	14
<b>CAPÍTULO 3 - EQUIPAMENTOS</b>	<b>18</b>
3.1 INTRODUÇÃO	18
3.2 DISPOSITIVOS DE SAÍDA INTERATIVOS	18
3.2.1 HISTÓRICO	19
3.2.2 DISPOSITIVOS MATRICIAIS DE RASTREAMENTO	21
3.3 DISPOSITIVOS DE SAÍDA PASSIVOS	26
3.4 DISPOSITIVOS GRÁFICOS DE ENTRADA	28
3.5 TECNOLOGIAS ATUAIS	30
<b>CAPÍTULO 4 - IMAGENS DIGITAIS</b>	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
4.1 DIGITALIZAÇÃO DE IMAGENS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
4.2 COMPOSIÇÃO DE IMAGENS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
4.3 ARMAZENAMENTO	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
<b>CAPÍTULO 5 - SISTEMAS GRÁFICOS</b>	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
5.1 MODELO CONCEITUAL DE PROGRAMAÇÃO GRÁFICA	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
5.2 PADRONIZAÇÃO DE SISTEMAS GRÁFICOS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
5.3 SISTEMA GRÁFICO - CD	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
5.3.1 CONTROLE DA SUPERFÍCIE DE VISUALIZAÇÃO	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
5.3.2 SISTEMAS DE COORDENADAS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
5.3.3 SISTEMA DE COR	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
5.3.4 PRIMITIVAS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
5.3.5 ATRIBUTOS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
5.3.6 IMAGENS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

**CAPÍTULO 6 - TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS** **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

- 6.1 TRANSFORMAÇÕES LINEARES **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**
- 6.2 CONCATENAÇÃO DE TRANSFORMAÇÕES **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**
- 6.3 COORDENADAS HOMOGÊNEAS **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

**CAPÍTULO 7 - VISUALIZAÇÃO 3D** **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

- 7.1 PROCESSO DE VISUALIZAÇÃO **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**
- 7.2 PROJEÇÕES **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**
- 7.3 REPRESENTAÇÃO INTERNA DOS DADOS **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

**APÊNDICE A - MANUAL DE REFERÊNCIA DO SISTEMA GRÁFICO CD****ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

## PREFÁCIO

Esta apostila foi preparada para servir como base para disciplina de Computação Gráfica e Interface com o Usuário (CGIU) do curso de Análise, Projeto e Gerência de Sistemas da CCE/PUC-Rio.

No capítulo 1 é dada uma visão das áreas existentes dentro da computação gráfica.

O capítulo 2 enfoca os conceitos básicos sobre luz e cor que são discutidos mais especificamente no capítulo 3 que trata dos equipamentos que são atualmente utilizados em computação gráfica.

Conceitos fundamentais sobre imagem digital é o que trata o capítulo 4, onde examina-se desde a criação, convenções, termos, limitações até o seu armazenamento.

O sistema gráfico CD é o enfoque do capítulo 5, e é a base do estudo sobre computação gráfica propriamente dita. Tomou-se a decisão de se utilizar o CD por ser um sistema gráfico facilmente disponível em todas as plataformas de *hardware* e por possuir conceitos que estão presentes em outros padrões gráficos.

O capítulo 6 aborda as transformações lineares mais comuns dentro da computação gráfica, sendo esta abordagem estritamente prática.

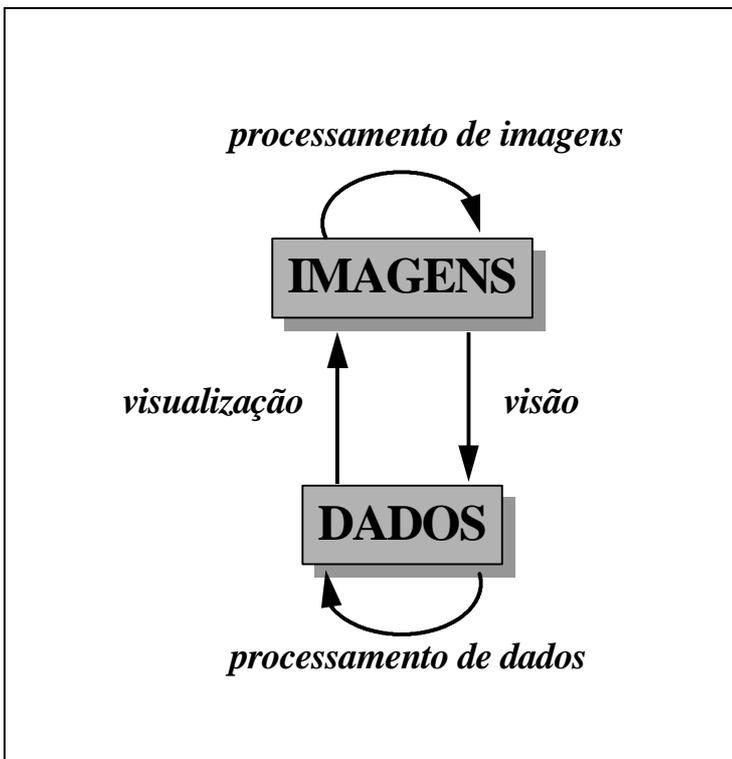
O capítulo 7 trata de visualização 3D, onde é feito um estudo simplificado sobre projeções e estrutura de dados.

O apêndice A contém o Manual de Referência do sistema gráfico CD.

## Capítulo 1 - Introdução a Computação Gráfica

Neste curso serão abordados, de uma forma genérica, vários tópicos relacionados à computação gráfica, com o objetivo de dar ao leitor uma visão geral das áreas existentes dentro desta disciplina.

Por uma definição formal, entende-se que : “Computação Gráfica é a disciplina que trata das técnicas e dos métodos computacionais, que convertem dados para dispositivos gráficos e vice-versa”. Em uma definição mais informal pode-se definir que: “Computação Gráfica é o veículo de comunicação homem/máquina mais adequado à percepção humana.”



Partindo-se destas definições pode-se então, conceber um modelo para representação das três grandes áreas da Computação Gráfica (como esquematizado na figura ao lado).

Como **visualização** entende-se que a imagem é gerada através de um modelo matemático que contém os elementos gráficos básicos (linhas, áreas, textos, etc.). Este área é mais conhecida como **Computação Gráfica Gerativa** e possui diversas áreas de atuação dentro da engenharia, geologia, cartografia, dentre outras.

O **Processamento de Imagens** busca o realismo da imagem digital, tentando torná-la mais acessível à percepção humana. Exemplos deste tipo de computação gráfica podem ser encontrados nas áreas: de pesquisa biológica, de defesa e pesquisa (interpretação de imagens obtidas por satélites), médicas (raios-X, tomografia), de filmes e vídeo, entre outras.

A **visão** baseia-se na obtenção da descrição da imagem digital, fornecida comumente por um conversor analógico/digital (**Reconhecimento de Padrões**). Por exemplo tem-se a “visão” de um robô industrial e a “leitura” por computador de caracteres manuscritos.

De modo a mostrar a generalidade da figura acima, quando se processa somente os dados e não há geração de imagens tem-se uma outra área dentro da informática que então é denominada de **Processamento de Dados**.

A computação gráfica possui profissionais com formação bastante variada. Engenheiros, arquitetos, matemáticos, artistas, médicos, entre outros, utilizam intensamente esta disciplina. Destacam-se os seguintes grupos nesta área:

- Implementadores de ferramentas: Desenvolvem sistema gráficos básicos (OpenGL, GDI).
- Programadores de Aplicações: Utilizam linguagens de programação para criação de programas específicos utilizando sistemas gráficos existentes.
- “Customizadores”:  
Adaptam programas existentes para aplicações específicas.
- Usuários:  
Utilizam programas existentes para a produção de imagens.

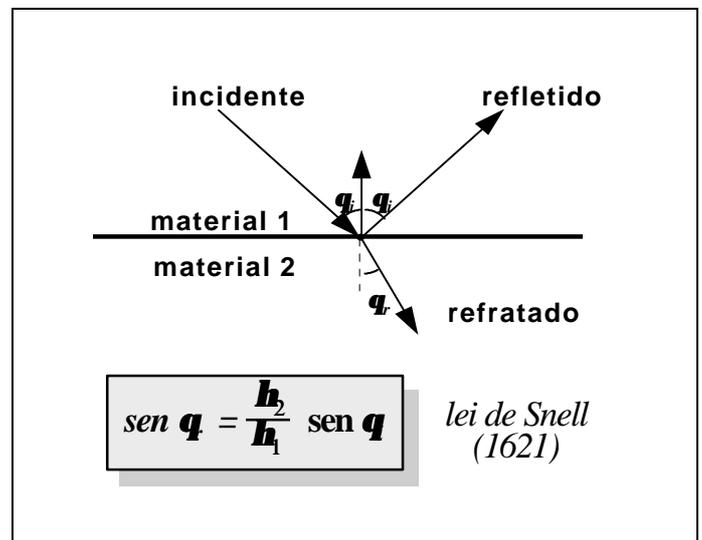


O espectro de luz visível, pode então assumir diversas cores (desde o violeta até o vermelho), em função do comprimento de onda, como exposto na tabela ao lado.

Cor	$\lambda$
Violeta	380-440 m $\mu$
Azul	440-490 m $\mu$
Verde	490-565 m $\mu$
Amarelo	565-590 m $\mu$
Laranja	590-630 m $\mu$
Vermelho	630-780 m $\mu$

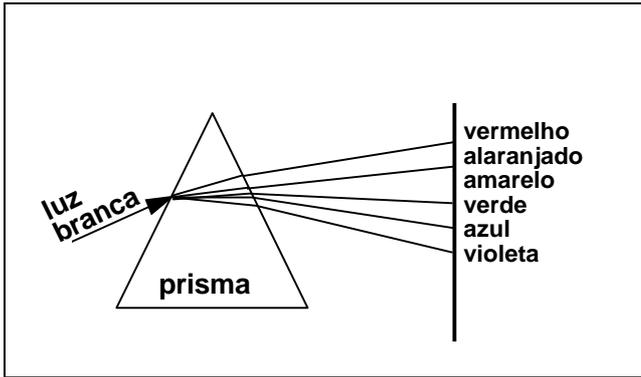
Como o comprimento de uma onda da luz é muito pequeno (da ordem de  $10^{-5}$  cm), a teoria da física se divide em dois grandes grupos: Ótica Física, que trata dos fenômenos ondulatórios da luz e Ótica Geométrica, que estuda o comportamento da onda quando esta interage com objetos muito maiores que o comprimento da onda da luz. Com relação ao nosso estudo se dará enfoque à Ótica Geométrica que assume que a direção de propagação da luz seja dada a partir de raios luminosos.

Desta forma, vai-se discutir agora dois fenômenos da Ótica Geométrica: a reflexão e a refração. Para tal, supõe-se que haja um plano, ao qual incide um raio luminoso e que parte deste raio seja refletido por este plano e parte seja refratado. Define-se como ângulo de incidência como sendo o ângulo formado pelo raio e a normal a este plano, ângulo de reflexão entre a normal do plano e raio refletido e ângulo de refração como sendo entre a normal e o raio refratado.



Pode-se provar (por ex. pela Lei da Conservação da Quantidade de Movimento) que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão (**Lei da Reflexão**), e que o ângulo de refração pode ser dado pela **Lei de Snell**, de acordo com o índice de refração de cada material.

Como já foi dito anteriormente, as ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo com a mesma velocidade  $c$ , ou seja, a velocidade da luz. Entretanto, quando estas ondas se propagam em um meio material, a velocidade de propagação de cada onda ( $v$ ) passa a ser função do comprimento de onda da radiação. Sendo assim, pode-se definir como o índice de refração de uma luz monocromática como sendo  $\eta = c / v$ . Estes fenômenos de reflexão e refração estão presentes no dia a dia, e devido a eles que ocorrem as miragens no deserto, o efeito de uma estrada parecer molhada e o fenômeno do arco-íris.

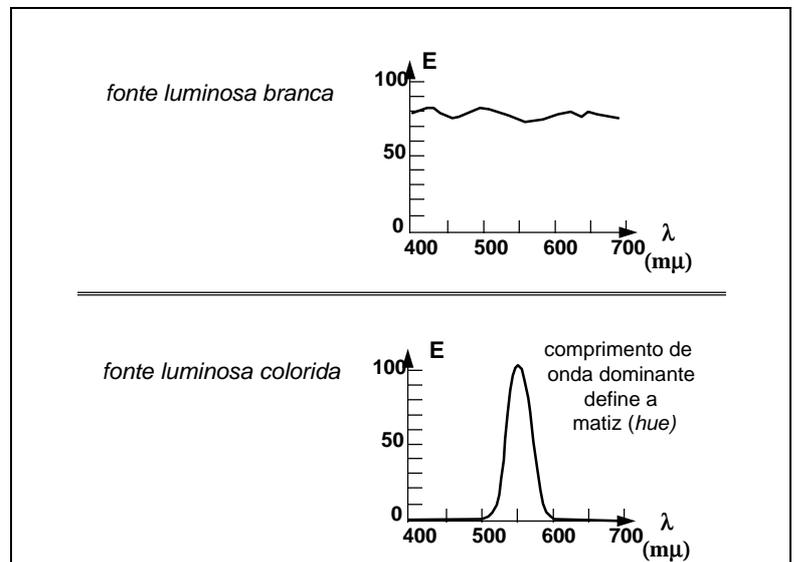


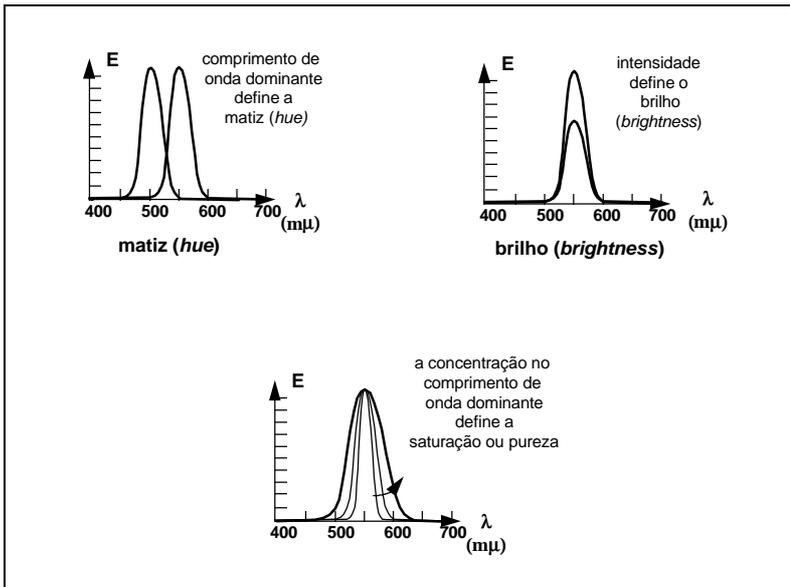
Um experimento do conhecimento de todos é que quando a luz branca incide em um prisma, há a decomposição desta nas cores do arco-íris.

Utilizando os conceitos de refração, Isaac Newton provou que a luz branca continha todos os comprimentos de onda e que quando esta incidia no prisma, havia então a decomposição desta nas cores do arco-íris. Para provar tal fato, Newton utilizou dois prismas, colocando o segundo recebendo as cores geradas pelo primeiro e compondo novamente a luz branca. Esta experiência foi necessária, pois na época, acreditava-se que o prisma criava as cores espectrais.

## 2.2 Processo de Formação de Cores

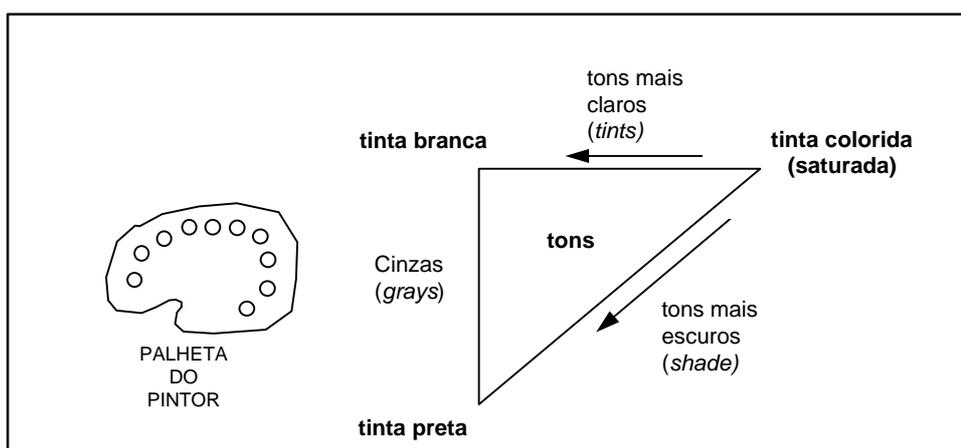
Aproveitando-se então a conclusão de Newton, pode-se então definir que as fontes luminosas brancas possuem todos os comprimentos de onda. Em conseqüência, uma fonte luminosa colorida tem um comprimento de onda dominante que define a sua matiz.

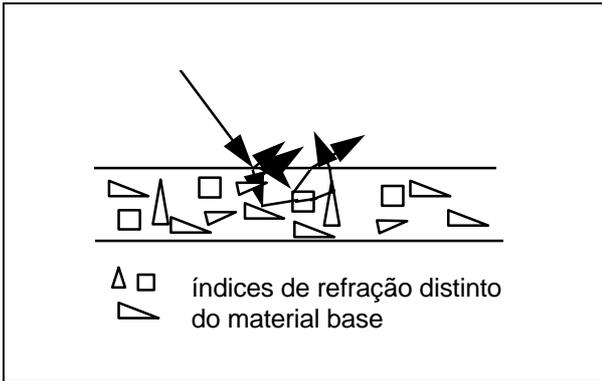




As fontes luminosas não são somente caracterizadas pela matiz (*hue*) que é a presença de um comprimento de onda dominante, também pode-se definir a intensidade ou brilho (*brightness*) - amplitude do comprimento de onda, e a saturação que é a concentração em torno do comprimento de onda dominante.

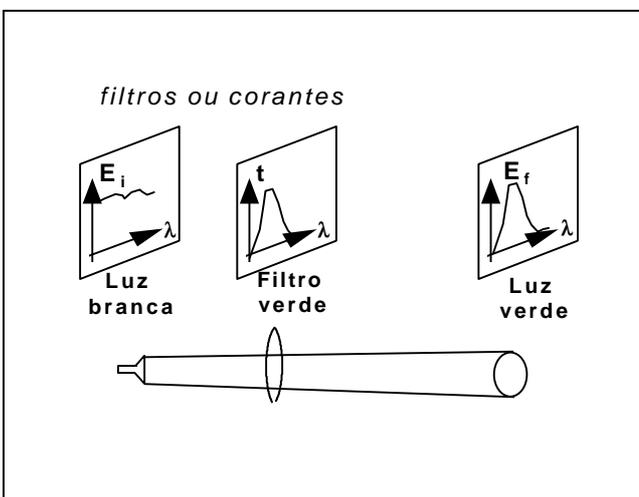
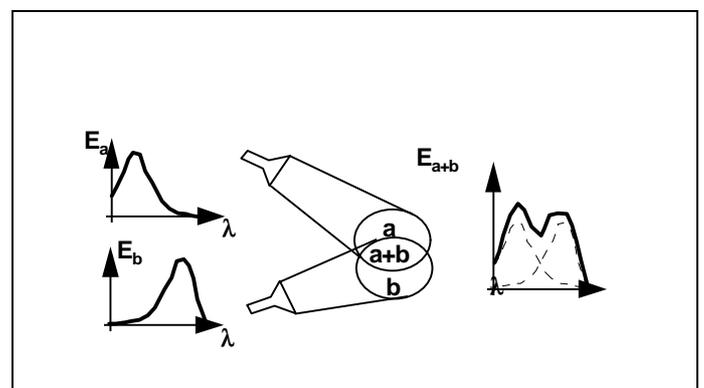
Tendo-se em mente, estas três principais características de uma fonte luminosa (matiz, brilho e saturação), vamos destacar um processo de formação de cores baseado na palheta de um pintor. Basicamente, tem-se de um lado tinta branca, do outro tinta preta e em uma outra extremidade tinta colorida (saturada). É intuitivo que ao se misturar a tinta saturada com a tinta branca há uma perda de pureza, tornando esta tinta mais clara (*tints*). Por outro lado, ao misturar-se esta tinta saturada com o preto ocorrerá uma perda de luminância, ou seja, tons mais escuros (*shade*). Os diversos tons de cinza (*grays*) aparecerão ao misturar-se a tinta branca com a preta, e todos os outros tons existentes ficarão espalhados dentro deste triângulo definido pelas cores branca, preta e tinta saturada, como mostra a figura abaixo.





O processo de formação de cores por pigmentação, baseia-se na descrição da palheta do pintor, uma vez que a luz ao atingir a camada de pigmentos sofre processos de reflexão, absorção e transmissão (fenômeno conhecido como espalhamento) produzindo assim a(s) cor(es) desejada(s). Esta técnica, como não poderia deixar de ser, é muito utilizada na pintura de quadros.

Um outro processo de formação de cores, é o chamado processo aditivo, um exemplo deste processo pode ser visto ao lado, onde duas fontes luminosas de cores diferentes são projetadas em duas regiões. Na área de interseção há a formação de uma nova cor, uma vez que, o olho não consegue distinguir componentes. O processo aditivo é usado, largamente nas televisões comerciais.

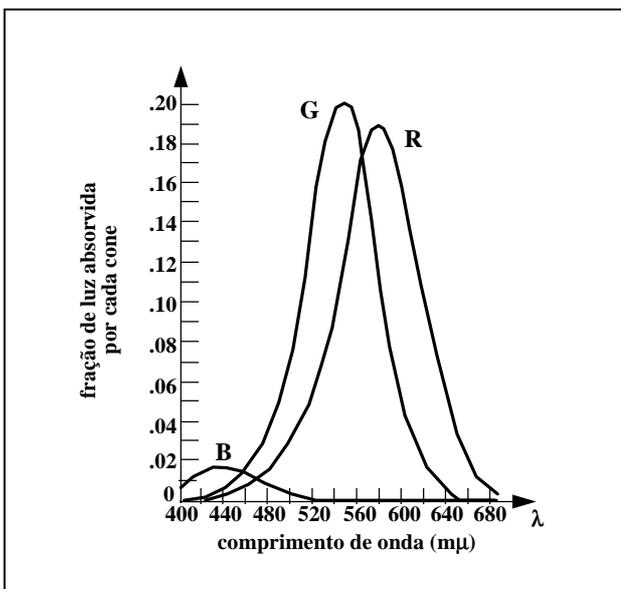
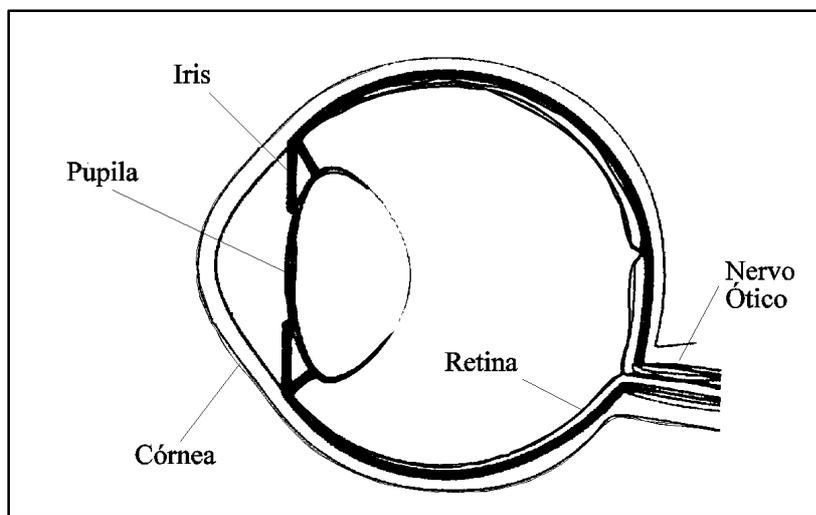


Um outro processo de formação de cores é o subtrativo que é o processo utilizado em *slides*. Este processo baseia-se no uso de filtros ou corantes que tem por objetivo filtrar determinados comprimento de onda. Exemplificando, ao se emitir uma luz branca (que possui todos os comprimentos de onda) sobre um filtro verde, este filtra **todos** os comprimentos de onda deixando só “passar” o comprimento de onda relativa a cor verde, produzindo assim o verde. Na utilização de corantes o processo é o mesmo só que são usados pigmentos que absorvem e refletem alguns comprimentos de onda.

## 2.3 Percepção humana

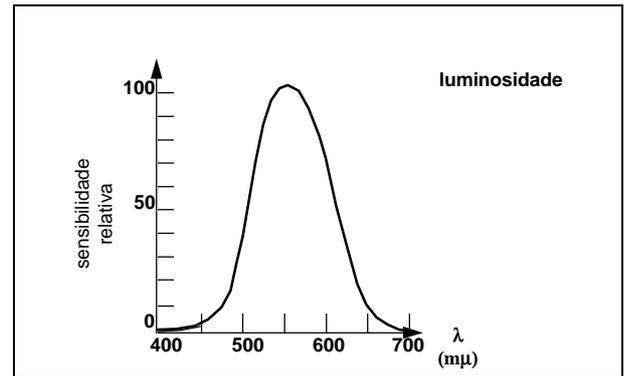
Como já foi mencionado anteriormente no processo aditivo de formação de cor, o olho humano não consegue diferenciar componentes e sim a cor resultante; diferentemente do ouvido que consegue distinguir, por exemplo, dois instrumentos diferentes tocados simultaneamente. Desta forma, seria então, interessante saber algo mais sobre o olho humano, responsável pela visão.

Os raios luminosos incidem na córnea sendo então refratados. A seguir estes incidem sobre a lente que tem por objetivo projetá-los na retina. Na retina encontram-se dois tipos de fotorreceptores os cones e os bastonetes, que convertem a intensidade e a cor da luz recebida em impulsos nervosos. Estes impulsos são enviados ao cérebro através do nervo ótico e então tem-se a percepção de uma imagem.

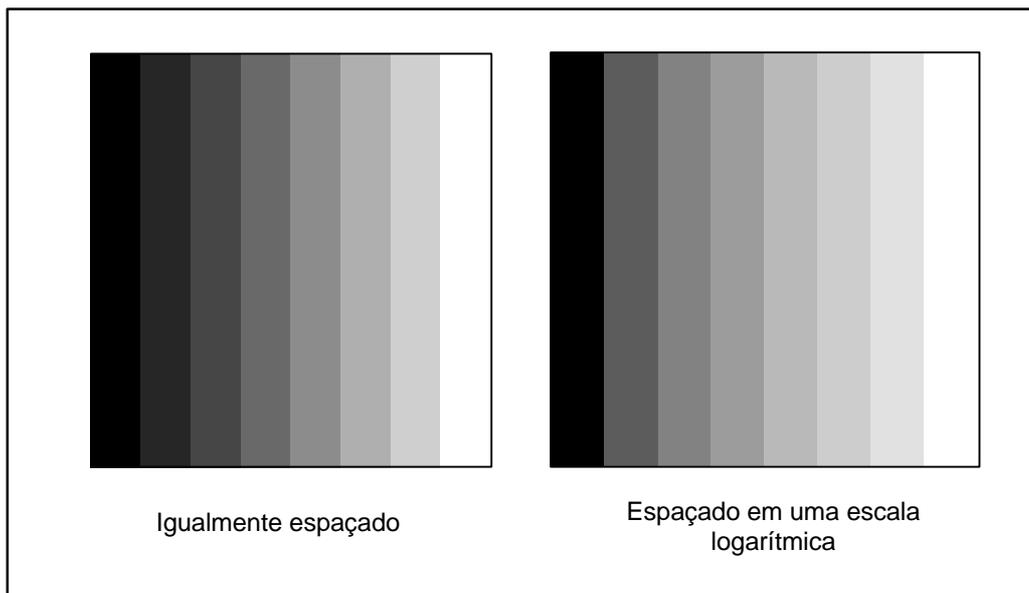


Os fotorreceptores do olho humano apresentam características totalmente diferentes. Existem na verdade três tipos de cones que respondem a espectro de cores distintos (vermelho, verde e azul), como mostrado ao lado. Sendo assim, diz-se que o sistema visual humano distingue as cores pelo processo da **tricromacia**. Nota-se que a eficiência do cone que responde a cor azul possui uma eficiência bem menor do que os outros dois tipos de cones.

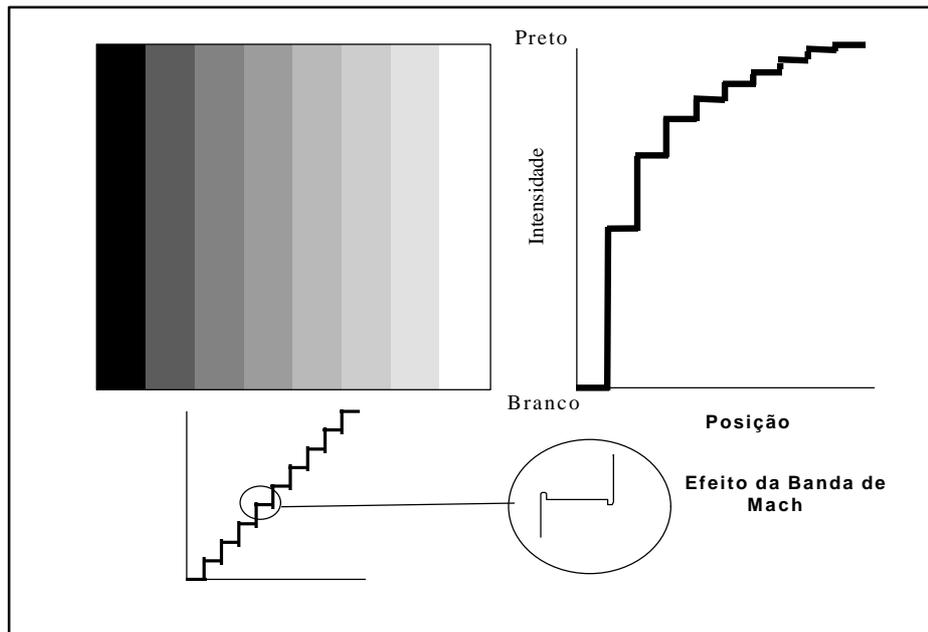
Os bastonetes por sua vez, embora sejam maioria absoluta, só conseguem captar a luminosidade da cor, ou seja, só respondem a um espectro e desta forma não diferenciam cores.



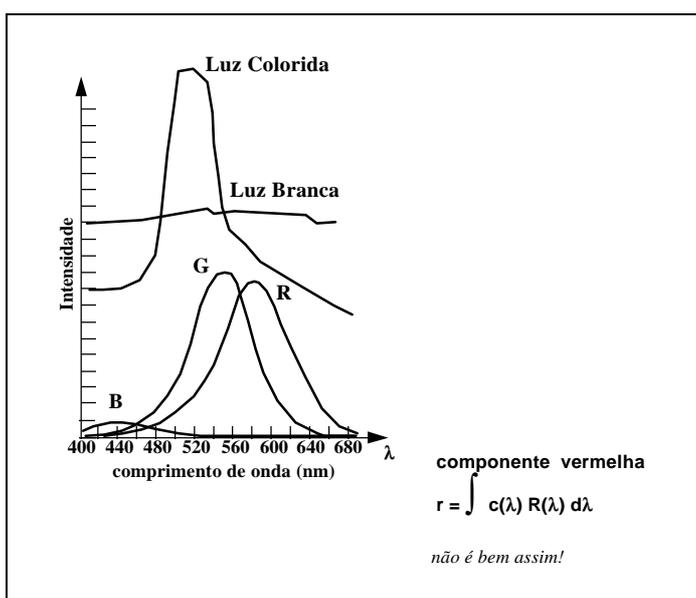
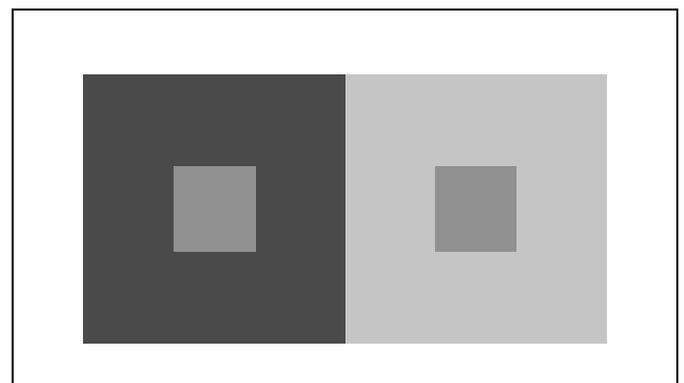
Sendo assim, na formação da imagem há uma interação dos cones e dos bastonetes, e decorrente desta interação ocorrem alguns fenômenos no sistema visual humano. O primeiro a ser destacado é que a percepção visual humana é logarítmica. Na figura a seguir, no primeiro quadro, os tons de cinza foram igualmente espaçados não se tendo uma impressão homogênea, parecendo que a faixa escura é mais densa. No segundo quadro, os tons de cinza foram perceptualmente espaçados, chegando-se aproximadamente numa escala logarítmica.



O segundo aspecto é o que se denomina de **Efeito da Banda de Mach**. Analisando-se os tons de cinza da figura a seguir, da cor mais escura para a mais clara, tem-se a impressão que existem pequenas discontinuidades na interface entre as cores (aumento da luminosidade - faixa constante - diminuição da luminosidade).

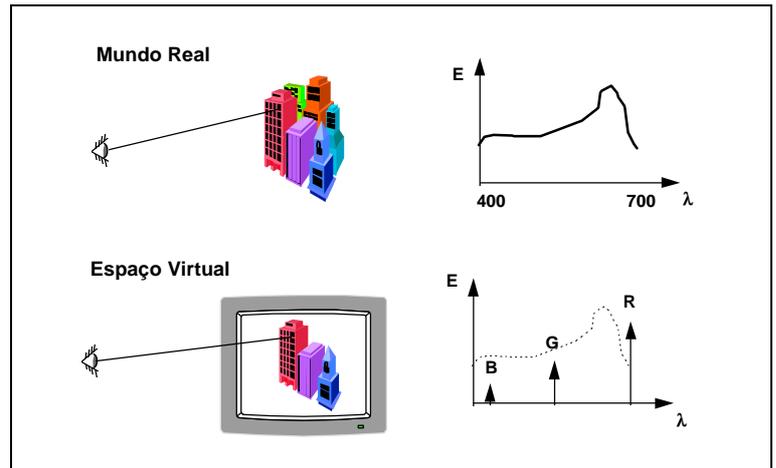


O último aspecto a ser abordado é o que se chama de **Contraste Simultâneo**. Analisando-se a figura ao lado, tem-se a impressão que o quadrado interno da esquerda é mais claro, embora possuam a mesma cor. Este fenômeno pode ser explicado a partir da luminosidade das áreas envolventes, ou seja, quando se tem uma área externa mais escura o quadrado interno parece ser mais claro.

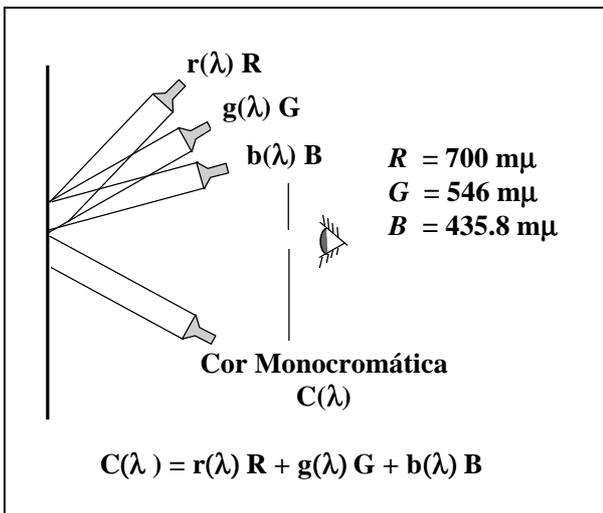


Uma vez vistos os aspectos principais do sistema visual humano, resta saber como se dá a percepção de uma cor? Matematicamente falando, deve-se compor em uma integral as componentes vermelha, verde e azul, para obter-se a cor desejada. Este pode ser o processo utilizado por um *scanner*, mas não pelo olho humano.

Restringindo-se o problema de reprodução de cores em Computação Gráfica, há necessidade de uma “combinação linear” das cores básicas para então formar as cores desejadas. A este processo dá-se o nome de **metamerismo**, ou seja, quando se tem a mesma sensação de cor.

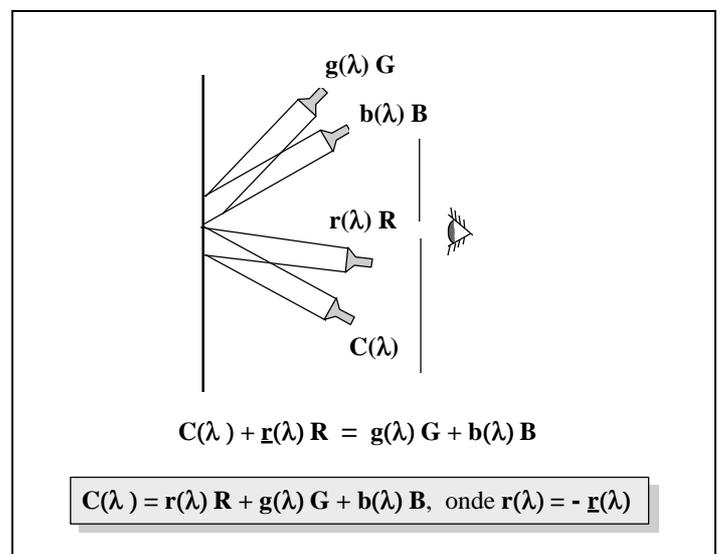


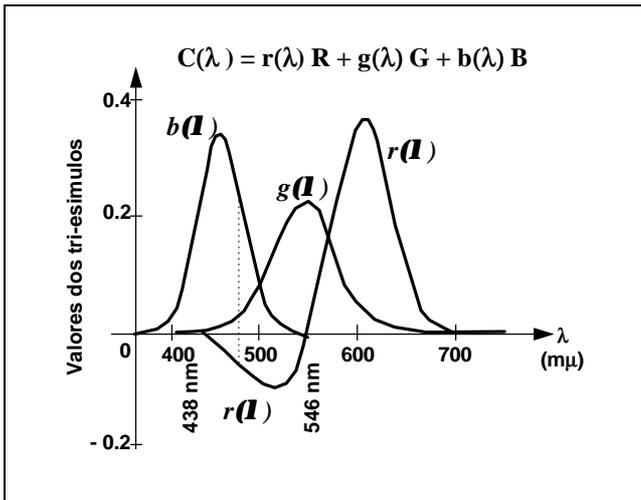
### 2.4 Diagrama de Cromaticidade



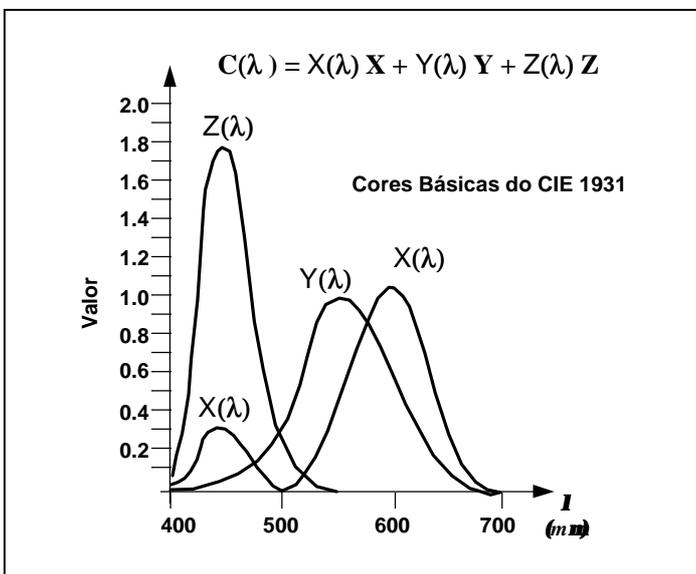
A Comissão Internationale de l'Éclairage (**CIE**), propôs um método para representação perceptual de cores, utilizando as cores básicas vermelho (*Red*), verde (*Green*) e azul (*Blue*), daqui para frente sendo denominado de RGB. Como já foi visto anteriormente, o olho humano não consegue perceber componentes, desta forma o que se fez foi projetar uma luz em um determinado anteparo e regulando-se a intensidade das cores RGB tentar produzir a mesma sensação de cor (**metamerismo**).

Entretanto, com o sistema proposto anteriormente, não se consegue representar todas as cores visíveis. A solução para contornar este problema, foi de utilizar o **artifício da subtração**, ou seja, faz-se uma das componentes RGB interagir com a cor desejada, produzindo então uma nova cor procurando com as outras duas restantes conseguir o **metamerismo**.





De acordo com o artifício de subtração utilizado, pode-se montar funções auxiliares, como mostrado ao lado, de modo a formarem as cores espectrais. Deve-se somente frisar que estas funções mostradas não são as distribuições espectrais, e sim funções que se combinadas reproduzem as cores espectrais, como por exemplo a cor  $C(\lambda)$ .



De forma a não utilizar valores negativos, o **CIE**, em 1931, definiu padrões primários - X, Y e Z, para substituir as cores RGB, para representar o espectro de cor, como por exemplo apresentado para a cor  $C(\lambda)$ . Estes padrões não correspondem a estímulos reais de cor, ou seja, não são cores visíveis. Um outro detalhe importante, é que o padrão Y foi escolhido, de forma a ser semelhante à curva de sensibilidade do olho humano (luminância).

Como já foi mencionado, as cores do sistema XYZ não são realizáveis fisicamente. Sendo assim, pode-se obter as grandezas colorimétricas desse sistema a partir do sistema **CIE-RGB**, a partir das seguintes hipóteses:

- as componentes de cor devem ser positivas,
- deve-se obter o maior nº possível de cores espectrais com algumas coordenadas de cromaticidade nula e,
- duas primárias devem ter luminância ZERO.

$$C(\lambda) = r(\lambda)R + g(\lambda)G + b(\lambda)B$$

Escolhendo-se XYZ tal que:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.36470 & -0.51515 & 0.00520 \\ -0.89665 & 0.14264 & -0.01441 \\ -0.46808 & 0.08874 & 1.00921 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

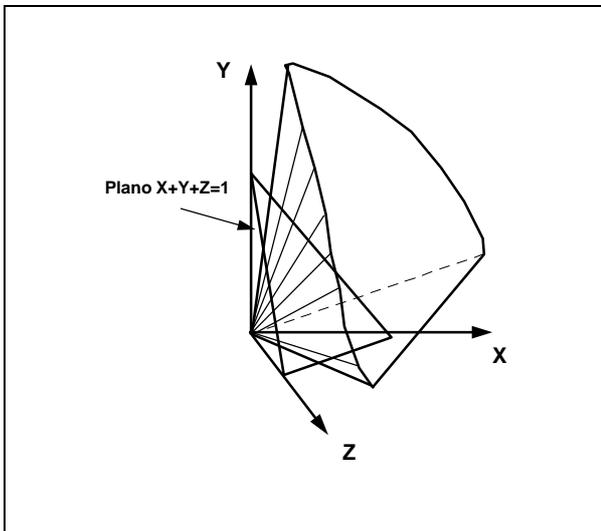
tem-se

$$C(\lambda) = X(\lambda)X + Y(\lambda)Y + Z(\lambda)Z$$

onde

$$\begin{aligned} X(\lambda) &= 2.36470r(\lambda) - 0.89665g(\lambda) - 0.46808b(\lambda) \\ Y(\lambda) &= -0.51515r(\lambda) + 0.14264g(\lambda) + 0.08874b(\lambda) \\ Z(\lambda) &= 0.00520r(\lambda) - 0.01441g(\lambda) + 1.00921b(\lambda) \end{aligned}$$

Finalmente, definindo os vetores da cor branca de referência de cada sistema e fazendo uma transformação inversa, obtêm-se as grandezas do sistema XYZ em função de RGB como apresentado no quadro da página anterior.

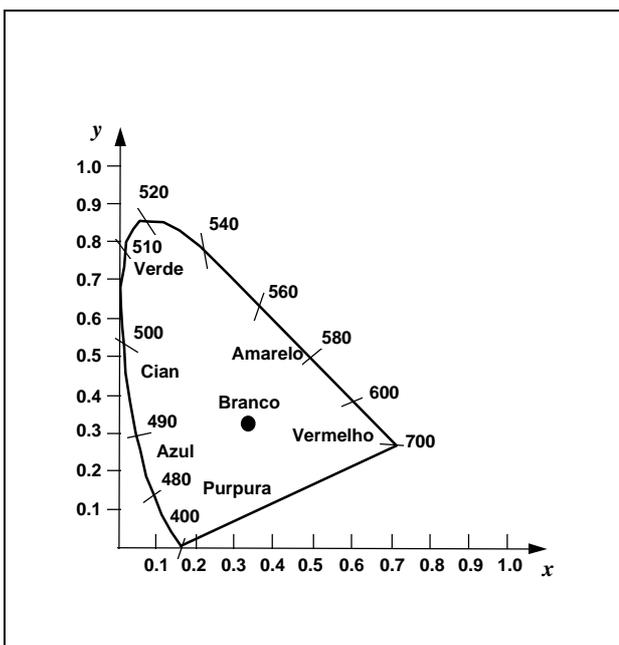


A forma do sólido de cor **CIE XYZ** (contem todas as cores visíveis) pode ser visto ao lado. Basicamente, é de forma cônica, com o vértice na origem. É apresentado também o plano de cromaticidade ou o plano de Maxwell ( $X + Y + Z = 1$ ), que tem importância para se obter uma representação paramétrica do espaço de cromaticidade. Pode-se destacar também o triângulo formado pela interseção deste plano com os eixos do espaço de cor XYZ que é chamado triângulo de Maxwell. Analisando-se a figura ao lado, pode-se concluir que as cores visíveis se encontram no primeiro octante do espaço de cor.

Uma cor **C** pode ser representada da seguinte forma  $\mathbf{C} = X \mathbf{X} + Y \mathbf{Y} + Z \mathbf{Z}$ . Pode-se definir valores de cromaticidade, que dependem somente dos comprimentos de onda dominantes e da saturação e são independentes da parcela de energia luminosa (luminância), a partir das seguintes equações:

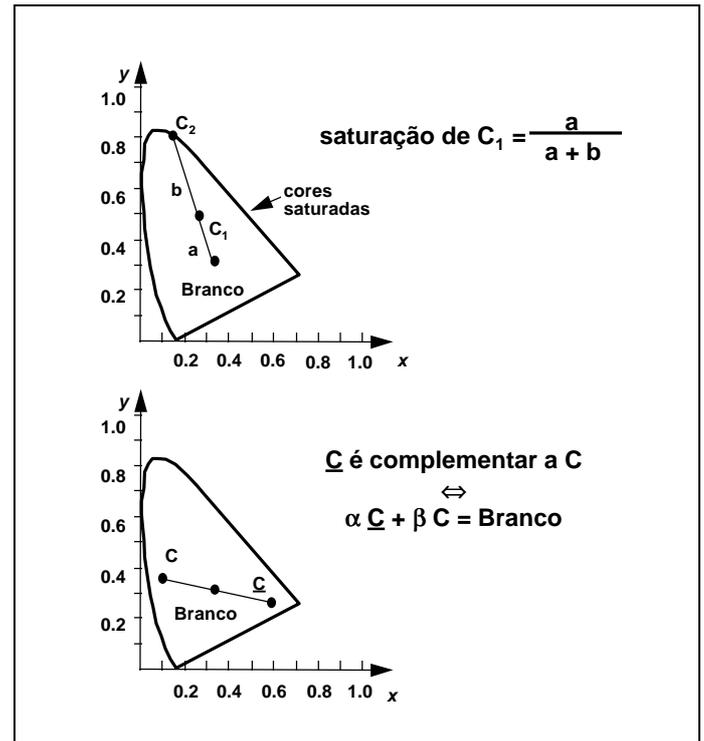
$$x = X / (X+Y+Z); \quad y = Y/(X+Y+Z); \quad z = Z/(X+Y+Z).$$

Nota-se que  $x+y+z = 1$ , uma vez que  $x$ ,  $y$  e  $z$  estão no plano  $X+Y+Z = 1$ .



Sendo assim, retirando o brilho ou a luminosidade da definição da cor em **CIE XYZ**, e utilizando as coordenadas de cromaticidade  $x$  e  $y$ , obtêm-se o **Diagrama de Cromaticidade do CIE**. O interior e o contorno deste diagrama com forma de ferradura representam todas as cores visíveis. Todas as cores puras do espectro estão localizadas na região curva do contorno, enquanto que a linha reta deste contorno é chamada de Linha Púrpura ou Linha *Magenta*, uma vez que ao longo desta linha se encontram as cores púrpuras e *magentas* saturadas. Estas cores não podem ser definidas por um comprimento de onda dominante e desta forma são denominadas não-espectrais. Destaca-se ainda neste diagrama a luz branca padrão que é definida em um ponto próximo de  $x = y = z = 1/3$ .

Utilizando-se o **Diagrama de Cromaticidade do CIE**, pode-se visualizar com mais facilidade conceitos como saturação de uma cor e cores complementares. Na parte superior da figura ao lado pode-se dizer que a saturação da cor  $C_1$  é definida como sendo  $a / (a+b)$ . Na parte inferior verifica-se que  $\underline{C}$  é complementar a  $C$  pois são cores que quando combinadas produzem a luz branca. Exemplos de cores complementares são: o ciano - vermelho, magenta - verde e amarelo - azul. Este diagrama pode ser útil na visualização de gamutes de monitores e impressoras, e serão vistos adiante no item sobre sistemas de cores utilizados nos dispositivos.

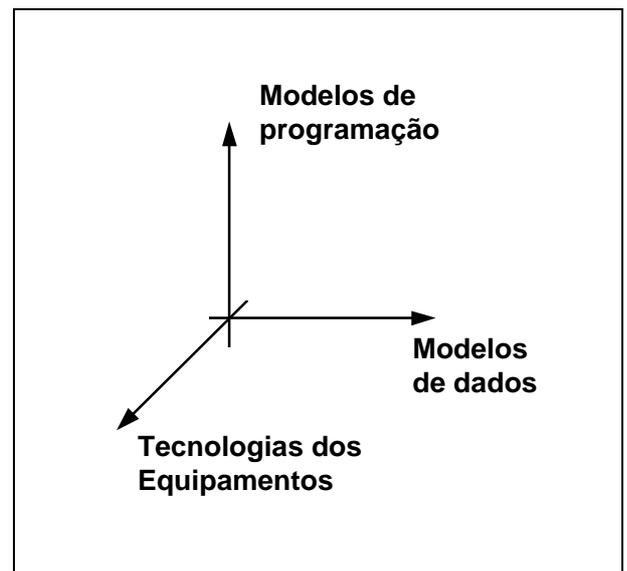


## Capítulo 3 - Equipamentos

### 3.1 Introdução

Os equipamentos desempenham um papel de grande importância dentro da Computação Gráfica, uma vez que a partir deles é que são visualizadas as imagens dos programas gráficos tornando possível a interação com o usuário. Serão abordados vários temas relacionados aos equipamentos como: histórico, evolução, os principais dispositivos gráficos hoje existentes, técnicas utilizadas e novas tendências.

Antes porém de inicializar o estudo sobre equipamentos, deve-se fazer uma consideração sobre a evolução destes. Analisando-se o triedro ao lado pode-se fazer a seguinte indagação “O que observar na evolução dos equipamentos?”. É óbvio que com o avanço da tecnologia os equipamentos evoluem. Esta evolução contribui para que determinadas áreas ligadas a modelos de programação e dados necessitem cada vez mais de equipamentos sofisticados (modelos bidimensionais para modelos tridimensionais, animação em tempo real). Desta forma, conclui-se que a evolução dos equipamentos não depende somente do avanço da tecnologia, mas de um contexto geral, como apresentado ao lado.

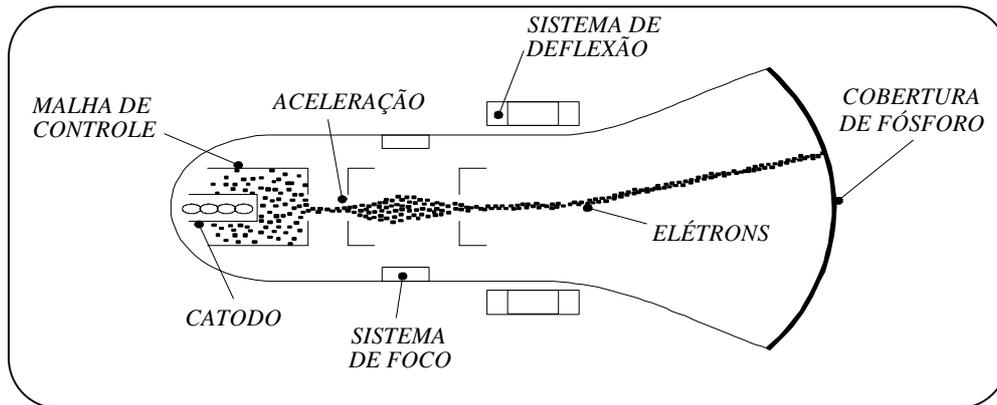


Os dispositivos gráficos, de uma forma geral, podem ser classificados de acordo com a sua função básica de transmitir dados de, ou para o computador da seguinte forma:

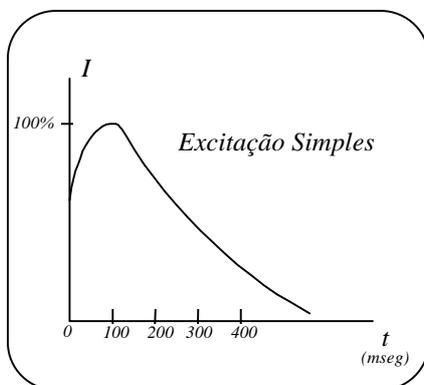
- dispositivos de saída interativos,
- dispositivos de saída passivos e
- dispositivos de entrada.

### 3.2 Dispositivos de Saída Interativos

Os dispositivos que exibem dados do computador, de forma com que o usuário interaja na criação do desenho, são ditos dispositivos de saída interativos. A maioria destes dispositivos, se baseia no tubo de raios catódicos (*Cathode Ray Tube* ou CRT), cujo funcionamento é ilustrado na figura seguinte. Através do tubo, um feixe de elétrons é dirigido a tela. A tela por sua vez, é coberta por uma camada de fósforo, elemento sensível, que brilha ao ser atingido pelo feixe, mas possui decaimento rápido (após 0.2 segundos do impacto, cerca da metade da luminosidade já se extinguiu, ver o comportamento do fósforo a seguir).



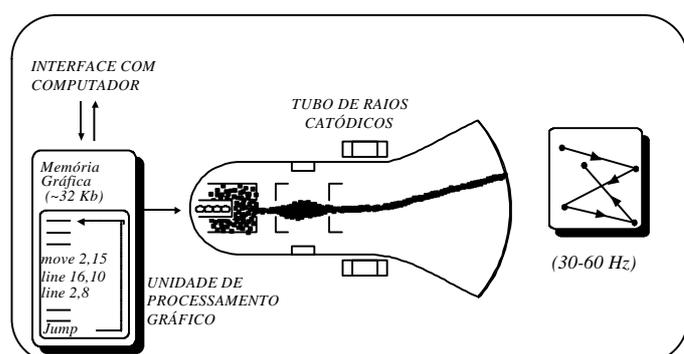
As diversas tecnologias, até hoje existentes baseadas em CRT, diferem na forma de manter o desenho “aceso”, fornecendo ao usuário a impressão de uma imagem constante na tela do terminal, uma vez que o olho humano possui uma limitação pra a visualização que é de 1/20 segundos.



### 3.2.1 Histórico

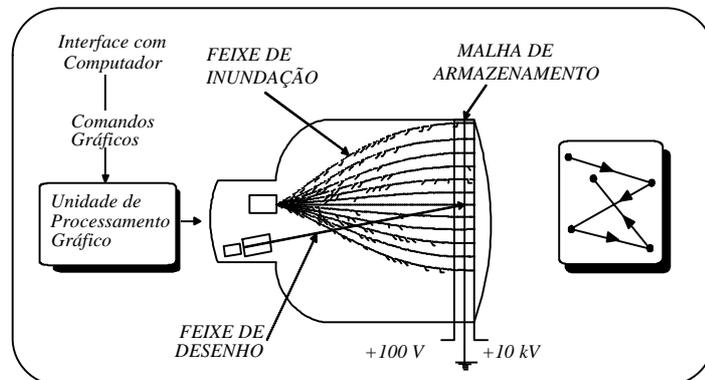
O primeiro dispositivo desenvolvido foi o vetorial de retraçamento (*vector refresh*), sendo utilizado entre aproximadamente 1960 e 1985. Apresenta uma técnica sofisticada para o traçado de linhas que consistia em redesenhar várias vezes a figura na tela (de 30 a 60 vezes por segundo, para evitar que a imagem fique piscando, fenômeno conhecido por *flickering*). Se cada

retraçamento o desenho a ser iluminado muda ligeiramente de posição, cria-se a ilusão de movimento. Por esta razão, estes terminais eram conhecidos por dinâmicos. O funcionamento esquemático destes dispositivos é apresentado acima.



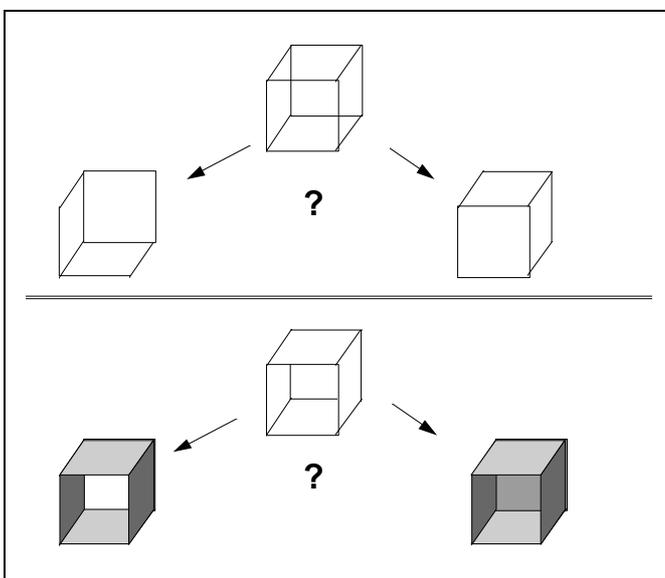
Nos terminais vetoriais dinâmicos a primitiva é a reta, e tinha como principais características: alta resolução, bom contraste, possibilidade limitada de cor, limitação de apresentarem imagens por linhas (modelos ditos de arame - *wire frame*), o alto preço e embora fossem capazes de redesenhar a tela rapidamente sem que o usuário percebesse, se houvesse uma quantidade de linhas muito grande poderia ocorrer *flickering*.

Os dispositivos vetoriais de armazenamento (*vector storage*) surgiram como solução para diminuir os custos dos equipamentos gráficos (1970 a 1985). Ao invés do refrescamento, as linhas a serem iluminadas ficam identificadas em uma placa cujo potencial é constante, conforme apresentado ao lado.



Desta forma, a luminosidade é mantida sem necessidade das altas taxas de transmissão do modelo de retraçamento. Como vantagens tinha-se o preço acessível, uma alta resolução, tamanho grande de tela, não ocorre *flickering*, e a primitiva continuava a ser a reta e possuía uma boa qualidade.

As desvantagens deste tipo de terminal eram: capacidade somente para representar modelos *wire frame*, não havia simulação de movimento e nem possibilidade de cor e a limpeza da tela era acompanhada de um brilho súbito.

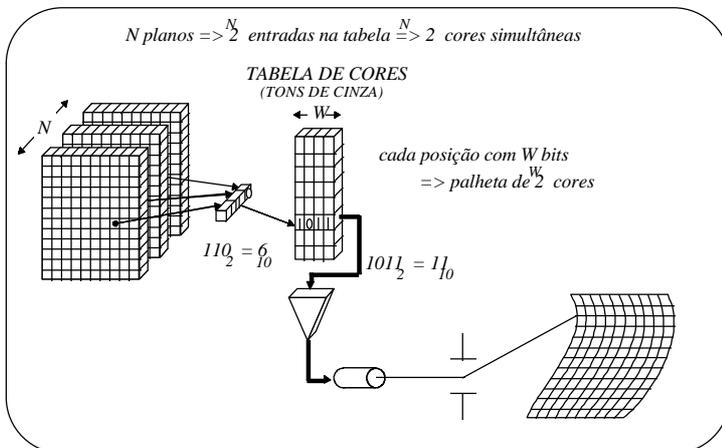
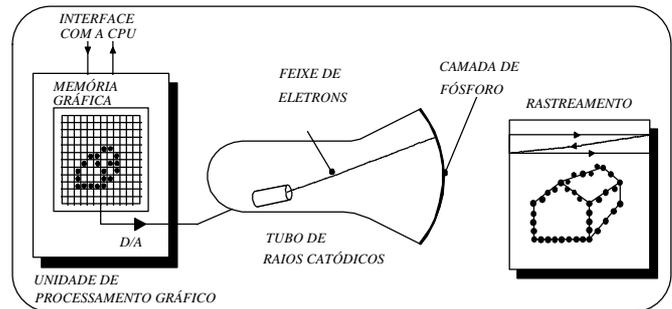


Os dois tipos de dispositivos acima descritos apresentavam como primitiva a reta. Entretanto, a representação de modelos vetoriais gera um problema muito sério na computação gráfica - a ambiguidade. Este problema pode ser facilmente visualizado nos exemplos apresentados ao lado. Na parte superior pode-se ter uma visualização do cubo nas duas formas mostradas dependendo da posição do observador e na parte inferior, um problema clássico de *rendering* de superfície.

### 3.2.2 Dispositivos Matriciais de Rastreamento

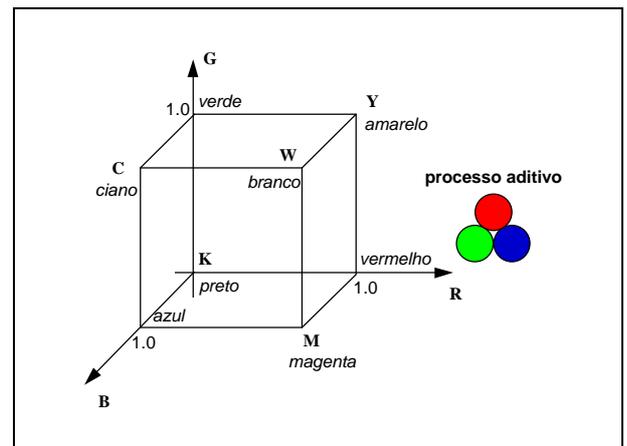
De forma a contornar os problemas dos dispositivos vetoriais e acompanhando a evolução da tecnologia, surgiram os dispositivos matriciais de rastreamento (*raster*) em torno da década de 80. Estes dispositivos utilizam a mesma tecnologia da televisão comercial, ou seja, a tela é composta de pontos, mas a exemplo dos vetoriais de retraçamento, o terminal não possui nenhuma capacidade de armazenamento, sendo assim, é necessária a reanimação contínua da tela, o que é feito linha a linha (rastreamento). A principal diferença entre estes terminais *raster* e os dinâmicos, é que na tecnologia *raster* todos os pontos da tela são “reanimados”, enquanto os dinâmicos, somente redesenha-se as linhas que compõem a figura.

A taxa de refrescamento - *refresh cycle*, varia entre 24 e 72 Hz. A primitiva é o ponto (*picture element* ou *pixel*), menor unidade para atribuições. Os terminais matriciais fazem uso de uma memória gráfica (*frame buffer memory*, *graphic memory*, ou *bit plane*), a fim de armazenar informações para cada um dos pontos endereçáveis da tela.. Há pelo menos um *bit* para cada ponto da tela. O funcionamento esquemático deste tipo de terminal é apresentado ao lado - monocromático com dois níveis

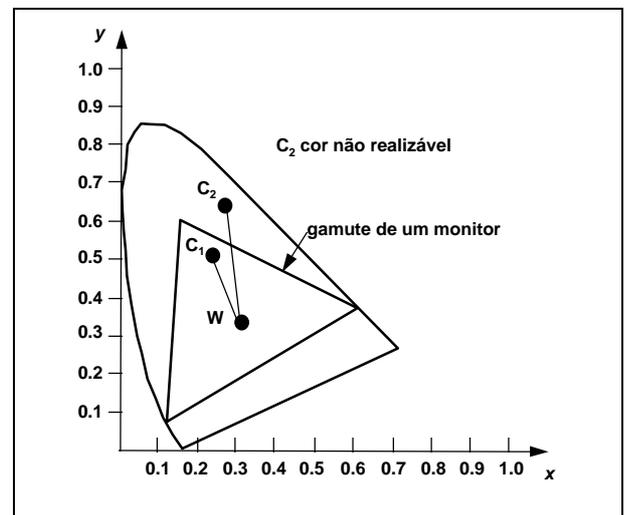


Diferentes níveis de intensidade podem ser incorporados por meio de *bit planes* adicionais. A combinação destes *bits* nos *bit planes* especificaria um nível de intensidade do feixe de elétrons, como mostrado ao lado, gerando tons de cinza.

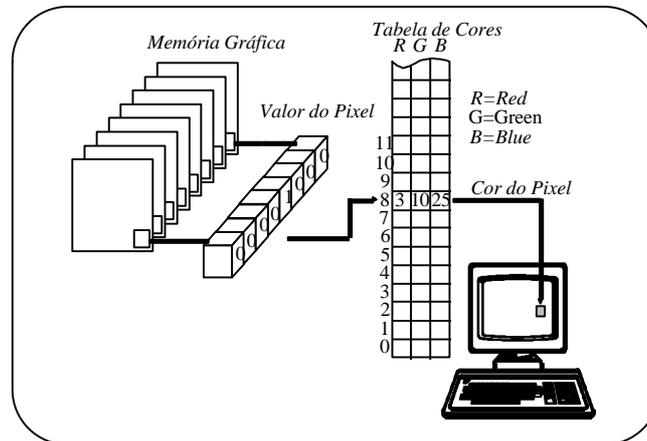
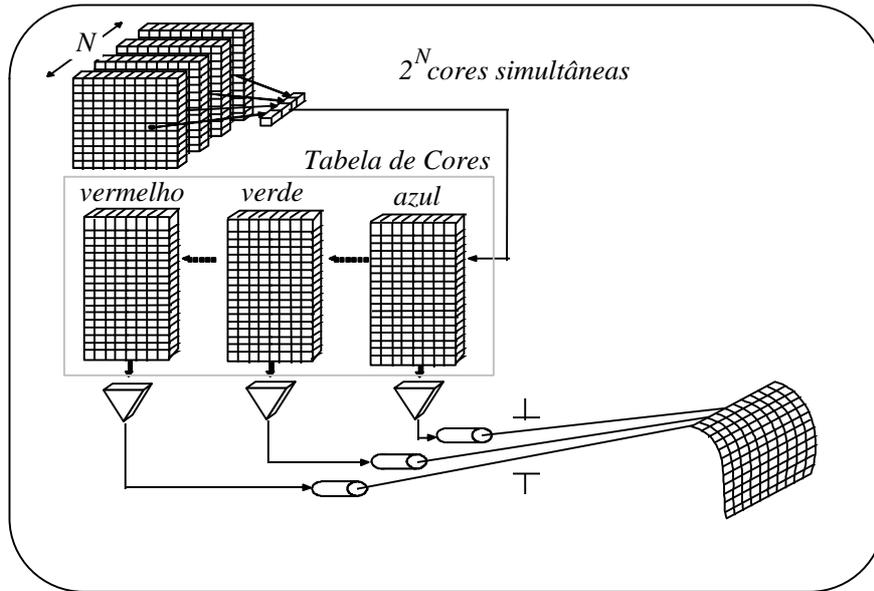
O sistema de cor de um monitor colorido possui uma base das cores primárias vermelho (*red*), verde (*green*) e azul (*blue*) e será denominado de **mRGB**. O sólido de cor deste sistema (cubo RGB) é um subconjunto do sólido gerado pela cores primárias, uma vez que cada cor tem uma intensidade máxima que é determinada pelo tipo de fósforo utilizado. O processo de formação de cores é o aditivo e a cor de cada *pixel* é determinada pela intensidade de cada cor primária incidente.



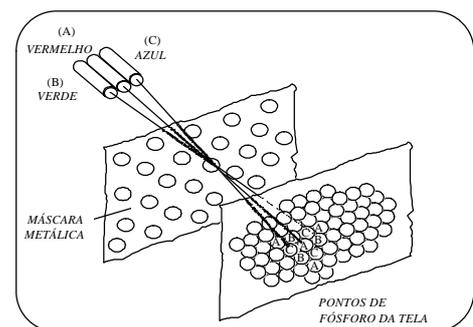
Utilizando-se o **Diagrama de Cromaticidade do CIE** pode-se então definir o gamute de um monitor baseando-se nos tipos de fósforos utilizados. Como apresentado na figura ao lado o triângulo formado apresenta todas as cores possíveis de se visualizar em um monitor colorido, excluindo-se a informação da luminância.



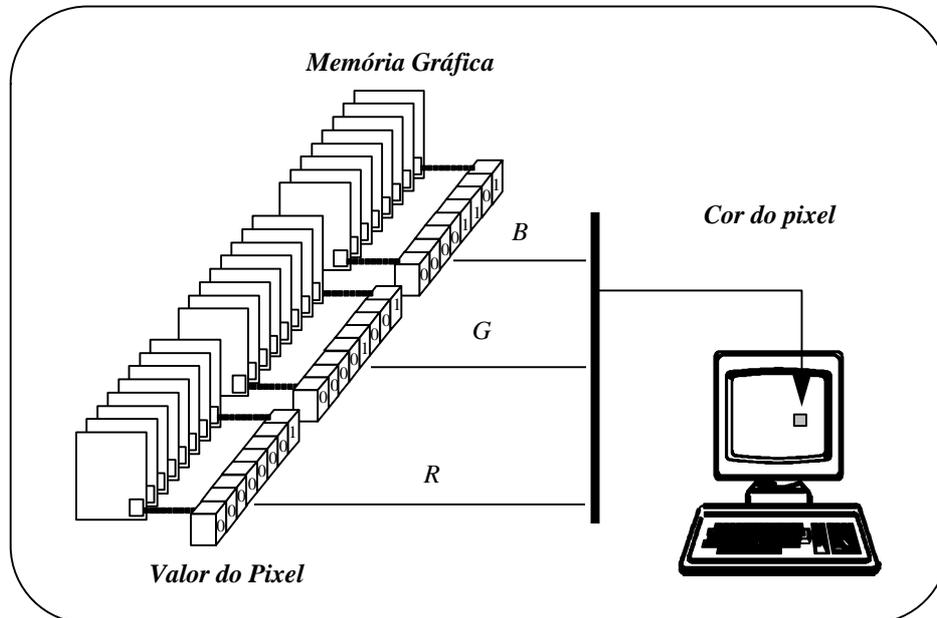
Desta forma, o funcionamento de telas com possibilidades de cores baseia-se na mistura do vermelho, verde e azul. O conceito de *bit planes* e tabela continuam válidos, no caso de monitores coloridos com *look-up table*, e o esquema do dispositivo colorido pode ser visualizado nas duas figuras da página seguinte.



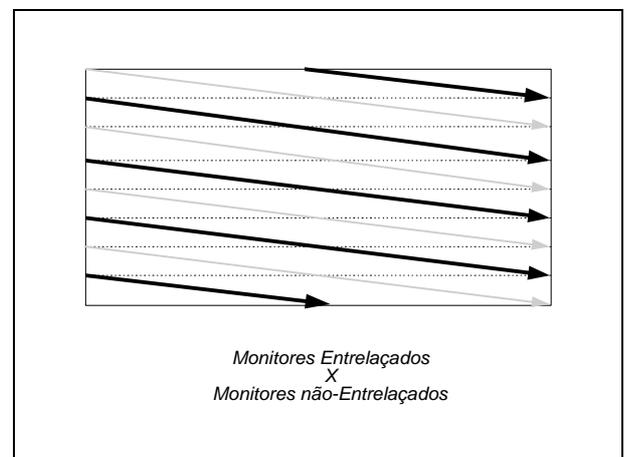
Como é mostrado no funcionamento esquemático dos monitores coloridos com *look-up table*, existem três “canhões” que bombardeiam os três tipos de fósforo existentes na tela. Este bombardeamento é feito utilizando-se uma máscara metálica que permite acessar somente determinados fósforos “gerando a cor do *pixel*”. Esta máscara pode ser vista ao lado.



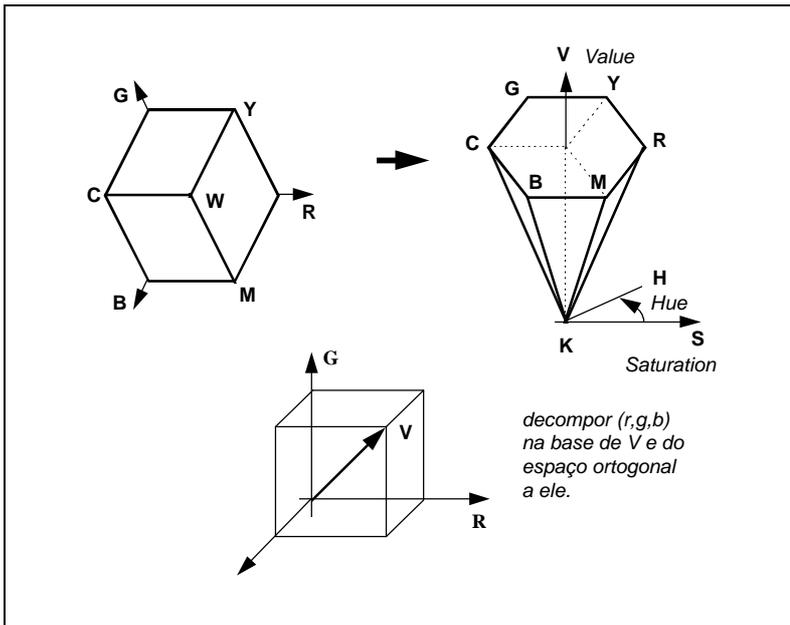
A tendência atual dos dispositivos é eliminar a tabela de cores, são os dispositivos chamados *true color*, por reservarem para cada cor primária 1 *byte*. Na verdade, o olho humano só consegue distinguir aproximadamente 400 mil cores ( $< 2^{19}$ ), logo 19 *bits* deveriam ser necessários. Entretanto, utiliza-se os 24 *bits* pois muitas destas cores são iguais perceptualmente, para a visão humana. A forma esquemática deste tipo de dispositivo pode ser vista abaixo.



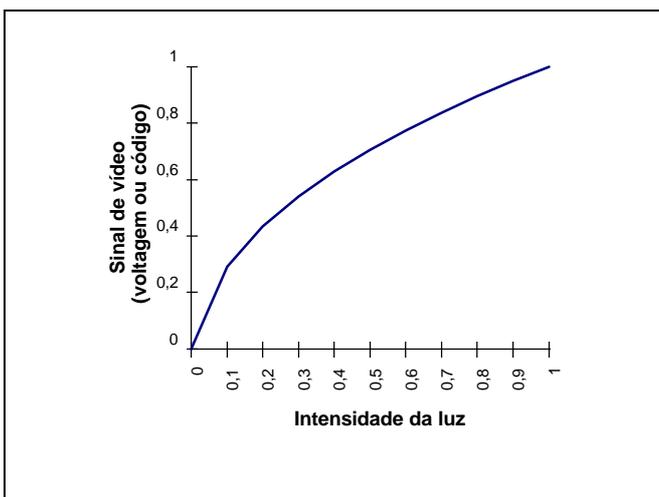
Um aspecto importante, que vale a pena ser ressaltado, são os padrões de varredura vertical de um monitor, que pode ser não-entrelaçado ou entrelaçado. O padrão entrelaçado é aquele que para fazer a varredura utiliza duas etapas (primeiro a dos campos ímpares e depois dos pares), adotando-se este comportamento permite-se frequências mais baixas para o retraçamento. O padrão não-entrelaçado é aquele que faz a varredura de uma única vez, e é o tipo utilizado em computação gráfica.



Continuando a abordagem sobre cores, é muito difícil para uma pessoa determinar uma cor qualquer utilizando o conceito das cores primárias, ou seja, quanto se deve ter de intensidade de vermelho, verde ou azul para a formação de uma determinada cor? Realmente, esta é uma pergunta difícil de ser respondida, uma vez que o sistema mRGB é definido para *hardware*. Desta forma, houve a necessidade da criação de sistemas que fossem mais apropriados para interface com o usuário, de forma que pudesse ser determinada uma cor mais intuitivamente. Um dos sistemas mais apropriados para desempenhar tal tarefa é o HSV (*Hue-Saturation-Value*), proposto por A. R. Smith em 1978. Como o próprio nome já diz, o sistema baseia-se na matiz da cor, na sua saturação e intensidade (cores claras/ escuras).



Estas três componentes variam em um sistema de coordenadas cilíndricas, onde a matiz varia ao longo dos círculos horizontais, a saturação varia na direção radial e a intensidade varia em um plano ortogonal ao plano da matiz-saturação. Basicamente, este sistema é uma transformação não-linear do sistema **mRGB**, uma vez que a base desta pirâmide hexagonal corresponde à projeção vista ao longo da diagonal principal do cubo mRGB (da cor branca para a preta), como pode ser visto ao lado.



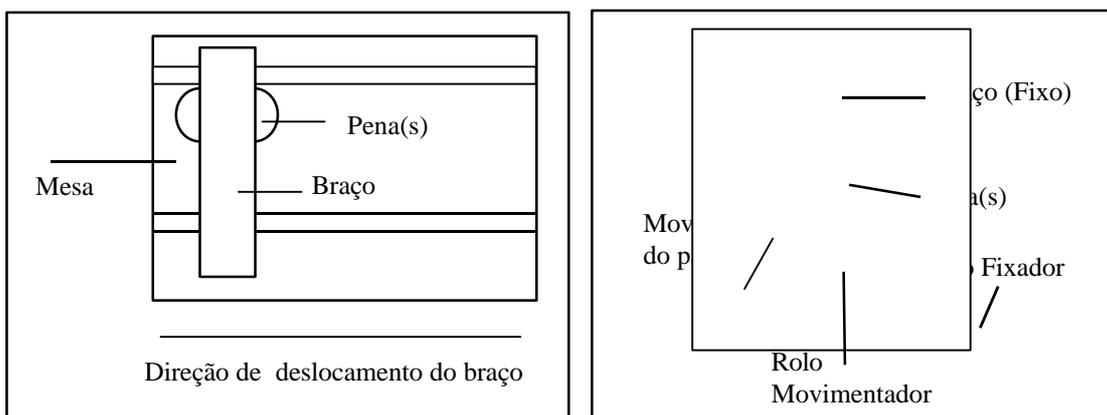
Toda a discussão sobre cores em monitores assume que existe uma relação linear entre o valor real de RGB e a intensidade produzida na tela. Entretanto, esta relação na prática não ocorre. Por exemplo, a intensidade vermelha produzida em um monitor ( $R_m$ ) dada por uma cor vermelha ( $R_i$ ) é definida como:  $R_m = K(R_i)^\gamma$ . Este fator  $\gamma$  serve para corrigir perceptualmente as cores uma vez que a visão do olho humano não é linear e sim em uma escala logarítmica. No gráfico ao lado pode-se visualizar como é feita esta correção de intensidades.

Os dispositivos matriciais possibilitam completa variedades de cores, permitindo a geração de imagens com foto realismo (figuras com sombra, reflexão, refração e textura). Atualmente, é a tecnologia dominante no mercado. Entretanto, existem outras duas tecnologias que apareceram na última década: plasma e cristal líquido. Os painéis de plasma tem comportamento semelhante aos do vetoriais de armazenamento, embora a primitiva seja a *pixel*. A ativação deste, é feita através de uma descarga elétrica em um gás (neon), produzidos em dois eletrodos, os painéis são planos, telas transparente e não ocorre *flickering*. Apresentam entretanto, limitada capacidade de interação, pequena velocidade de desenho e resolução apenas razoável. Os dispositivos de cristal líquido, hoje dominam o mercado nas faixas de computadores portáteis do tipo *laptop* e *notebook*. Suas principais vantagens são baixo consumo de energia e tela plana (menor volume e peso). A qualidade de sua imagem, entretanto, não alcança a qualidade dos terminais baseados em CRT.

### 3.3 Dispositivos de Saída Passivos

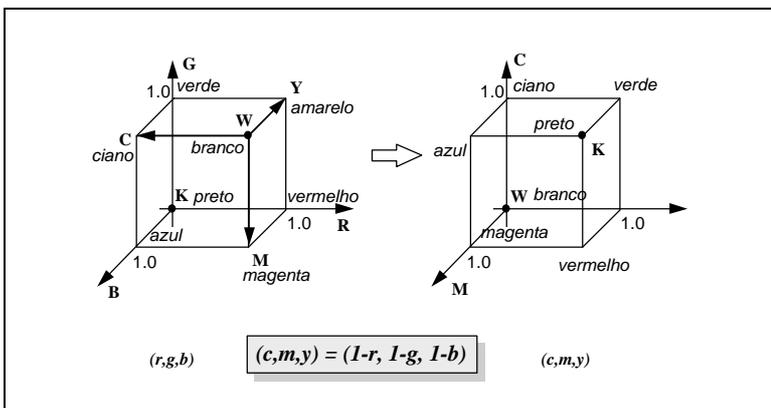
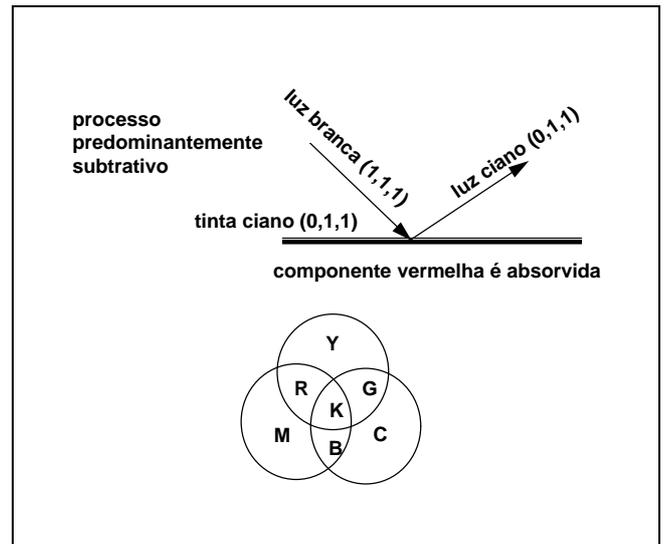
Os dispositivos de saída passivos têm como finalidade a produção de cópias permanentes sem interação com o usuário.

O primeiro tipo destes dispositivos são os vetoriais de acesso randômico, nestes terminais a primitiva gráfica é a reta, que pode ser executada em qualquer posição da superfície de visão (papel, microfilme, transparência, etc.). Pertencendo a esta categoria temos as plotadoras de pena de mesa ou de rolo. As plotadoras de mesa - *flatbed plotters*, possuem uma superfície horizontal onde o papel é preso, um braço mecânico que se movimenta em uma direção da mesa, e nele existem uma ou mais canetas se deslocando perpendicularmente à direção do braço. O funcionamento esquemático deste tipo de terminal é mostrado abaixo. Nas plotadoras de rolo - *drum plotters*, o papel não fica horizontal, um tambor (ou rolo) executa o movimento em uma direção, para frente e para trás, auxiliado por outros dois que seguram o papel, enquanto que sob o braço, agora fixo, as canetas se deslocam na outra direção. As plotadoras de mesa são mais rápidas e precisas que as de rolo. Estas entretanto, apresentam como vantagem uma dimensão do desenho praticamente ilimitada e se justificam em aplicações que não necessitam de muita precisão, dispensando portanto, o uso de uma tecnologia mais cara.



Um segundo tipo dos dispositivos de saída passivos são os matriciais por rastreamento, onde a primitiva gráfica destes dispositivos é o ponto. As figuras são armazenadas em matrizes de pontos, e cada um é associado a um caracter, uma cor e/ou uma intensidade. A impressão se processa linha a linha. Funcionam com esta técnica as plotadoras eletrostáticas, copiadoras de tela, as plotadoras de injeção de tinta, as impressoras matriciais e as impressoras a *laser*. Nas plotadoras eletrostáticas a imagem é obtida em duas fases: primeiro o papel é carregado, ponto a ponto, com cargas do mesmo sinal para posições a serem escurecidas; muito rapidamente a seguir, o papel é exposto a uma tinta com carga oposta e o desenho se forma. Os desenhos geralmente são preto e branco e alguns com tonalidades de cinza. Têm como principal vantagem a velocidade. As copiadoras de tela são para reproduzir imagens de um terminal gráfico. É feita a partir do mapeamento da tela e da conversão do sinal de vídeo para dados de plotadoras matriciais. Os resultados são rápidos, porém, de baixa qualidade. As plotadoras de injeção de tinta foram desenvolvidas para representar áreas ao invés de linhas coloridas. O papel passa através de um rolo, onde um braço fixo permite o movimento lento de três injetores de tinta (vermelho, verde e azul), em direção perpendicular ao andamento do papel. As impressoras matriciais e as impressoras a *laser* possuem uma memória gráfica semelhante a um terminal matricial de rastreamento de um *bit* de profundidade. A qualidade da impressão está vinculada à resolução, que varia de 60 a 120 DPI (pontos por polegada) nas impressoras matriciais e de 300 a 600 DPI na impressão a *laser*.

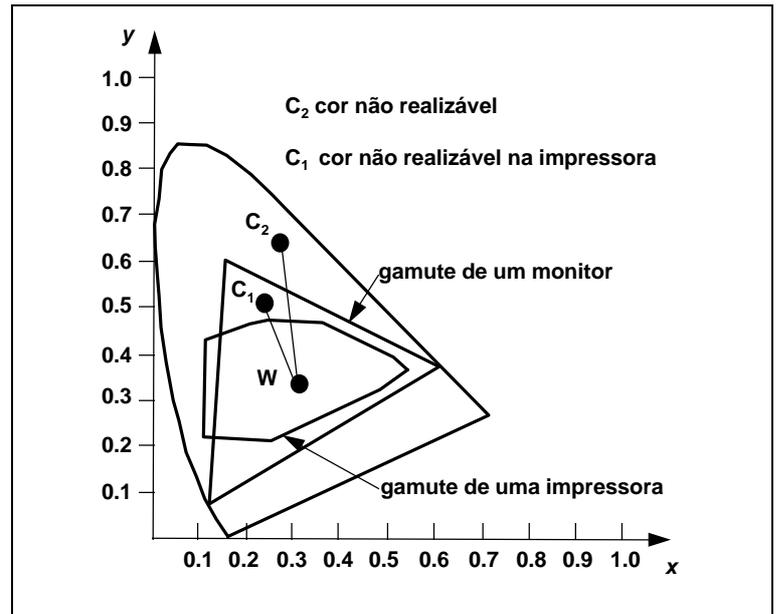
Uma questão importante sobre as impressoras matriciais coloridas é com relação ao sistema de cor utilizado, que não é o mesmo utilizado pelos dispositivos matriciais de rastreamento, que é o sistema aditivo **mRGB**. Nas impressoras coloridas utiliza-se o sistema subtrativo **CMY** (*Cyan, Magenta, Yellow*). A escolha deste sistema é simples, porque no papel o processo de percepção de cor é diferente, pois neste caso a luz é refletida no papel e não emitida como nos monitores, como a reflexão é um processo subtrativo utiliza-se então as cores complementares do RGB, ou seja CMY.



A conversão do sistema **mRGB** para o **CMY** é trivial, devido a complementaridade tem-se:  
 $(c,m,y) = (1-r, 1-g, 1-b)$ .

No sistema **CMY** para se obter o preto deve-se subtrair todas as cores. Nota-se que a cor atingida não é propriamente o preto mas sim, uma tonalidade próxima do cinza escuro. Desta forma, criou-se um outro sistema **CYMK**, em que a letra K representa a cor preta (*black*). Sendo assim, a cor preta foi adicionada ao sistema de cor e tratada praticamente como uma cor primária independente.

Um problema clássico em computação atualmente está ligado a representação de cores, ou seja, dada uma determinada figura colorida na tela, é uma tarefa muito difícil reproduzi-la em uma impressora colorida da mesma forma. Este fato pode ser facilmente visualizado com o auxílio do **Diagrama de Cromaticidade do CIE** quando se coloca os gamutes de dispositivos: um monitor e uma impressora coloridos.

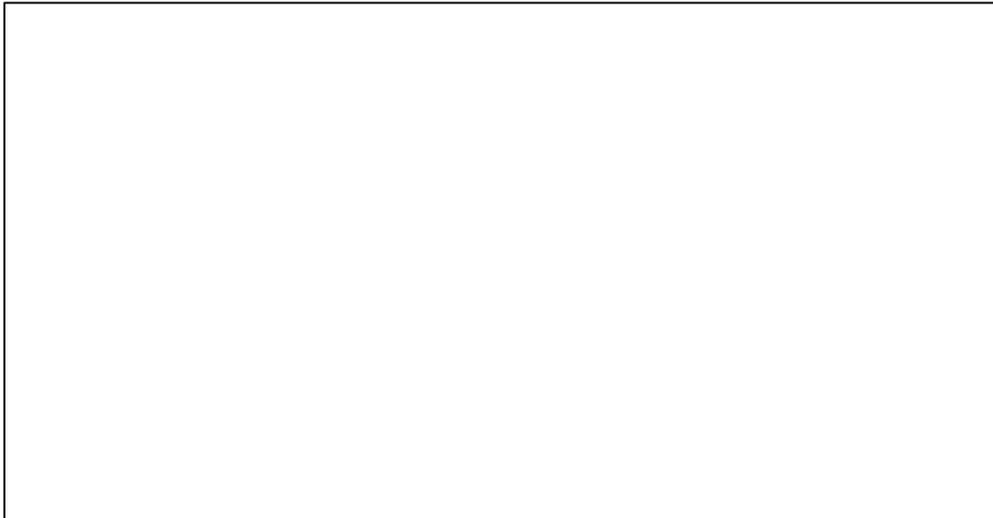


### 3.4 Dispositivos Gráficos de Entrada

Existem diversos tipos de dispositivos gráficos de entrada utilizados na computação gráfica e que podem ser classificados de acordo com a tarefa de interação que eles desempenham. Merecem destaques os localizadores, selecionadores e valoradores. Os localizadores são dispositivos que permitem obter a localização (coordenadas) de um ponto na superfície de visão (ex. terminal gráfico). O mecanismo físico típico desta classe é a mesa digitalizadora - *data tablet*. A mesa digitalizadora é capaz de reconhecer a posição de uma caneta (*stylus*), através de perturbações magnéticas. Um outro dispositivo que funciona como localizador é o *touch panel*. Os valoradores servem para obter um valor real dentro de uma escala pré-fixada. O dispositivo físico mais representativo deste conceito é o potenciômetro. Existem também o *joystick*, *track ball* e o *mouse*. Os selecionadores selecionam objetos de uma figura. O dispositivo natural para representar um selecionador é a caneta ótica - *light pen*. A caneta ótica é um dispositivo que é capaz de perceber quando os elementos do desenho estão sendo redesenhados em um terminal do tipo vetorial dinâmico ou matricial de rastreamento. Desta forma, o elemento de desenho e o segmento a que ele pertence são enviados ao computador.

Existem ainda um segundo grande grupo que tem por objetivo a **captura de imagens**. Pode-se dividir este grupo dependendo do tipo de imagem a ser capturada: os *scanners* que capturam imagens impressas e os *frame grabbers* que capturam imagens de vídeo.

Os *scanners* são muito semelhantes às máquinas fotocopadoras, onde uma fonte de luz em forma de uma linha varre a imagem impressa e mede a quantidade de luz refletida ou transmitida em cada ponto. A luz refletida é convertida em sinal elétrico através de um conjunto de fotodetetores que também formam uma linha. O sinal elétrico é finalmente digitalizado e enviado ao computador. Existem dois tipos de *scanners* os manuais e o de mesa. A diferença entre eles é com relação a verredura, que no primeiro caso é feita manualmente e no segundo caso é feita automaticamente, onde o próprio aparelho desloca a fonte de luz e os fotodetetores. A resolução da imagem pode variar de 70 até 4000 DPI, que podem gerar imagens de altíssima qualidade porém com um consumo de memória extremamente alto (Projeto Portinari - qualidade da imagem de um *slide* aprox. 245 *Mbytes*).



*Frame Grabbers* são dispositivos que permitem que uma imagem de vídeo gerada por uma câmera ou um vídeo-cassete possa ser digitalizada diretamente a partir do sinal elétrico que a representa, que em geral está disponível como uma saída do equipamento. O sinal de vídeo é organizado em linhas de imagem, que contem um sinal analógico cada uma, dependendo do sistema utilizado (PAL ou NTSC). Como se trata de um sinal contínuo para uma televisão, não se tem somente uma única imagem estática e sim várias imagens (30 quadros por segundo). Portanto, para se adequarem a este sincronismo, digitalizadores de sinal de vídeo são bem mais rápidos que *scanners*, e geralmente fornecem imagens pequenas e de uma qualidade inferior a estes.

### 3.5 Tecnologias Atuais

Todos os aplicativos existentes atualmente, possuem um apelo visual muito grande, pois têm um alta interação com os usuários. Desta forma, hoje em dia, é inconcebível que programas não possuam dispositivos de interação como ícones, janelas, menus, etc. Até bem pouco tempo atrás, estes aplicativos eram privilégios somente das grandes e caras estações de trabalho, entretanto, por razões econômicas, há uma migração destes *software* gráfico para plataformas PCs. Entretanto, o desempenho destes aplicativos eram extremamente baixos, havendo então a necessidade de uma mudança tecnológica tão avassaladora quanto a provocada pelo próprio surgimento da GUI. Desta forma, surgiram placas gráficas (aceleradores gráficos), que possuem um processador dedicado e memória RAM, liberando assim, a CPU de grande parte do processamento gráfico, tornando então viável, a migração destes aplicativos. Existem três grandes áreas de atuação destas placas : gráficos 2D, gráficos 3D e vídeo.

A aceleração em gráficos 2D, como é chamada, consiste em acrescentar rapidez a operações *BitBlts*.

A utilização dos gráficos 3D está cada vez mais emergente e encontram-se nos pacotes comerciais de CAD, aplicações científicas, em jogos, em interfaces de sistemas de realidade virtual e em modelagens de simulações realísticas. O *software* 3D dá a ilusão de profundidade, efeitos de luz, sombra e movimento em um espaço tridimensional, construindo um mundo extremamente próximo da realidade. A aceleração 3D desta forma, é um processo minucioso que envolve várias etapas, oferecendo realismo em troca de um alto custo em desempenho. As principais etapas que envolvem o *rendering* podem ser assim enumeradas: filtro para o *rendering* 3D, introdução de luzes e sombras, projeção e aplicação de texturas.

Na área de multimídia, um mercado cada vez mais explorado na área de informática, encontram-se então as placas aceleradoras de vídeo. Na verdade, este nome aceleradora não é o corretamente empregado, uma vez que nenhum clipe será exibido em uma velocidade maior do que foi gerado, ou aumentará a resolução ou grau de detalhe da imagem. O que este dispositivos realmente fazem é aumentar as proporções do vídeo para além do seu tamanho natural - tornando mais fácil a visualização de detalhes - sem reduzir a velocidade de exibição e uma consequente perda de quadros.

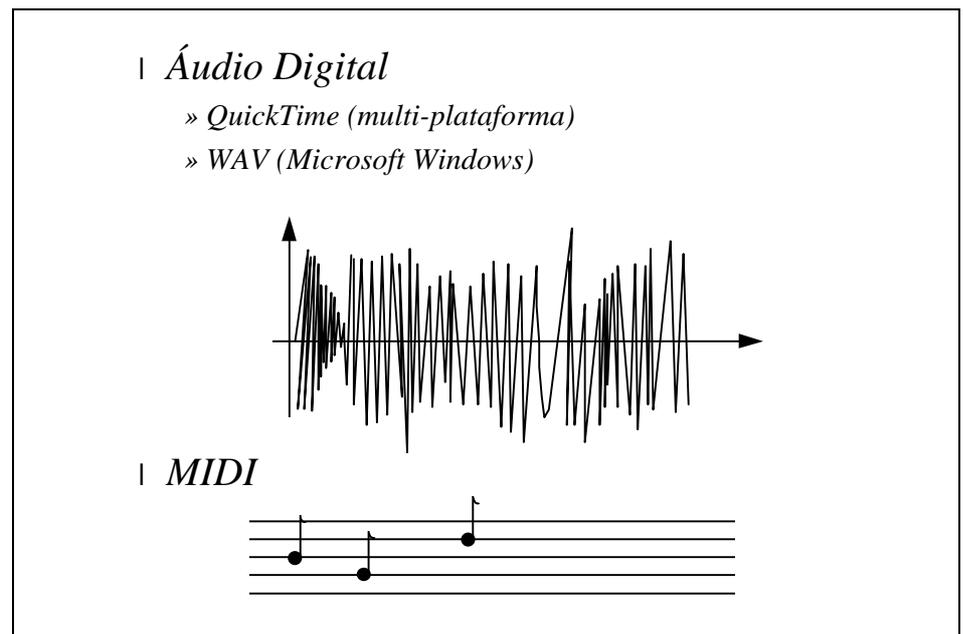
O sistema de cores geralmente empregados são os chamados sistemas de cor baseados em decomposição da luminância-crominância. Este sistema tem como princípio que o sistema visual humano tem menor sensibilidade para detectar variações de cor do que variações de luminância

Um problema crítico para utilização de vídeos é quanto ao armazenamento. Por exemplo, um único quadro não comprimido de 24 *bits*, digitalizado com uma resolução de 640 por 480 pontos (VGA) precisa de aproximadamente 900 *kbytes* para ser armazenado. Lembrando que deve-se mostrar 30 quadros por segundo, um CD-ROM conseguiria exibir apenas 25 segundos de vídeo. Sendo que para isso, deveriam existir leitoras de CD-ROM que operem a uma taxa cinco vezes maior que as de uma unidade de CD-ROM com velocidade quádrupla. Os produtores de *software* multimídia resolveram este problema de dois modos: comprimiram o vídeo usando chips conhecidos como *codec* e digitalizaram os cliques em uma resolução de 160 por 120 ou 320 por 240. Entretanto, este trabalho acaba criando uma sobrecarga nas CPUs, e sendo assim, as aceleradoras de vídeo reduziram em muito este problema, tornando para si a tarefa de ajustar as dimensões que podem ser vistas confortavelmente. Com relação a este aspecto, deve-se lembrar que a ampliação de imagens exige a adição de novos *pixels*, por meio de replicação, interpolação ou as duas técnicas combinadas.

O funcionamento básico destes aceleradores é ler o arquivo .AVI para que se conheça o processo *codec* utilizado para comprimir o clipe. A partir daí é chamado o *codec* apropriado, que começa a recompor o vídeo em sua resolução e espaço em cores originais, normalmente em **YUV** (um sistema de padrão que define as cores em função da cromaticidade e luminância). A partir daí, é feito o tratamento adequado, e então convertida a imagem para **RGB** (sistema de cores da placa).

Finalizando esta parte sobre equipamentos, será abordado as placas de som, uma vez que atualmente o “visual” somente não é suficiente. As imagens transmitem todas as informações possíveis, mas a música e os efeitos sonoros podem ajudar a prender a atenção da audiência por um tempo maior.

De uma forma geral, acrescentar som a sua aplicação é feita basicamente por duas tecnologias distintas: áudio digital e MIDI (*Musical Instrument Digital Interface*, ou Interface Digital para Instrumentos Digitais).



O áudio digital permite que se grave e/ou reproduza qualquer tipo de som, com uma alta qualidade (captura a expressividade dos instrumentos), principalmente quando se trata da voz humana. As gravações soam iguais quando reproduzidas em qualquer equipamento. Entretanto, necessita de grandes quantidades de armazenamento, por exemplo, se fosse alcançado a satisfação do ouvido humano - sons na frequência de 40 kHz (40 vezes por segundo) - um ponto de 16 *bits* em dois canais estereofônicos nesta frequência seriam necessários aproximadamente 10 *Mbytes* por minuto. O que realmente se faz, em muitos *software* na área de multimídia é adotar metade desta frequência em um canal mono com 8 *bits*.

A MIDI permite que se grave ou reproduza apenas as notas geradas pelo *software* MIDI ou por instrumentos. A grande vantagem de se usar MIDI é que pode-se controlar inteiramente a música (reproduzir o som em qualquer instrumento que o sintetizador da placa de som possa tocar) e controle completo da edição, uma vez que, com MIDI não é armazenado o som propriamente dito e sim dados, que podem ser editados como se faz em edição de textos. Sendo assim, os dados armazenados ocupam bem menos espaço do que uma gravação digital. Entretanto, a MIDI, possui duas grandes desvantagens a música geralmente soa diferente quando tocada por sintetizadores diferentes e instrumentações sintetizadas normalmente perdem a expressividade que uma gravação em áudio digital consegue capturar.