

COLORIMETRIA E TV A CORES

PTC2547 – PRINCÍPIOS DE TELEVISÃO DIGITAL

Guido Stolfi – EPUSP – 08/2016

1. Fundamentos

Sabemos que a sensação de cor de uma fonte de luz (ou de um objeto) está associada á distribuição espectral da emitância (ou refletância) dessa fonte. No entanto, várias distribuições espectrais diferentes podem proporcionar a mesma sensação de cor. Em 1669, Isaac Newton realizou experimentos com prismas (Fig. 1.1), através dos quais descobriu que a luz solar era formada pela combinação das cores do arco-íris (ou seja, de componentes monocromáticas compreendendo uma certa faixa de comprimentos de onda).

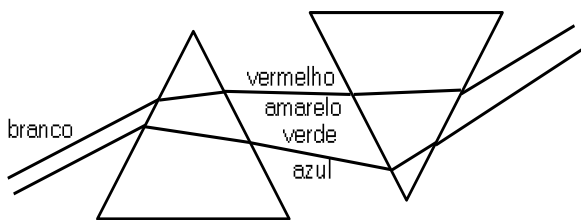


Fig. 1.1 - Experimento de Newton

Através da inserção de anteparos entre os dois prismas, ele pôde examinar qual a percepção de cores decorrente da combinação de dois ou mais estímulos monocromáticos. Descobriu que a sensação de luz branca poderia também ser obtida pela soma de duas componentes monocromáticas adequadas, como azul e amarela. Observou então que as cores do espectro podiam ser agrupadas em pares complementares, cuja soma produz a sensação de luz branca (a exceção é o "magenta", que não é uma cor espectral, e sim a combinação de luz vermelha e azul).

λ (nm)	cor		λ (nm)	cor
590 - 560	amarelo	\Leftrightarrow	470 - 430	azul
605 - 590	laranja	\Leftrightarrow	430 - 380	violeta
780 - 605	vermelho	\Leftrightarrow	500 - 470	ciano (turquesa)
---	magenta	\Leftrightarrow	560 - 500	verde

1.1 Características Subjetivas da Cor

Uma determinada cor pode ser descrita por três aspectos subjetivos (sensoriais), que correspondem a características objetivas (psicofísicas). O *Brilho* de determinada cor pode ser associado à luminância; a *Tonalidade* equivale ao comprimento de onda dominante, e a *Saturação* à pureza ou concentração espectral (fig. 1.2).

2. Características da Visão Colorida

Segundo a teoria tricromática da visão, introduzida por Young e Helmholtz, a retina possui grupos de células receptoras (cones) que são sensíveis em 3 regiões distintas de comprimentos

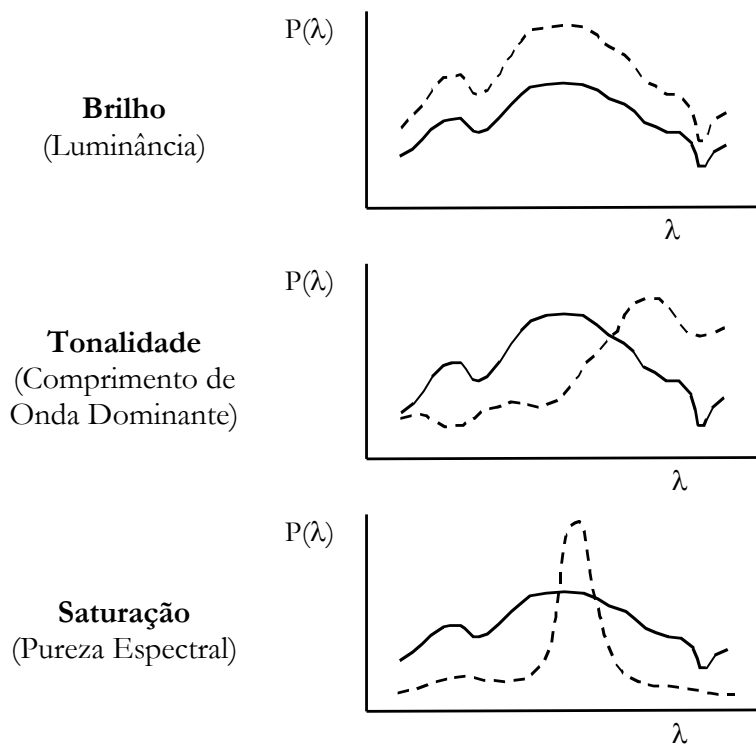


Fig. 1.2 - Equivalência entre grandezas subjetivas e objetivas

deficiências visuais relacionadas, como a *protanopia* (perda de distinção entre verde e vermelho) ou a *tritanopia* (entre azul e amarelo), que são variantes do Daltonismo.

Sendo $P(\lambda)$ a densidade espectral de potência de uma fonte luminosa, os valores dos estímulos **R**, **G** e **B** resultantes seriam dados por:

$$R = \int P(\lambda) \cdot F_R(\lambda) d\lambda ; \quad G = \int P(\lambda) \cdot F_G(\lambda) d\lambda ; \quad B = \int P(\lambda) \cdot F_B(\lambda) d\lambda$$

onde $F_R(\lambda)$, $F_G(\lambda)$ e $F_B(\lambda)$ são respectivamente as curvas de sensibilidade espectral dos cones "vermelhos", "verdes" e "azuis".

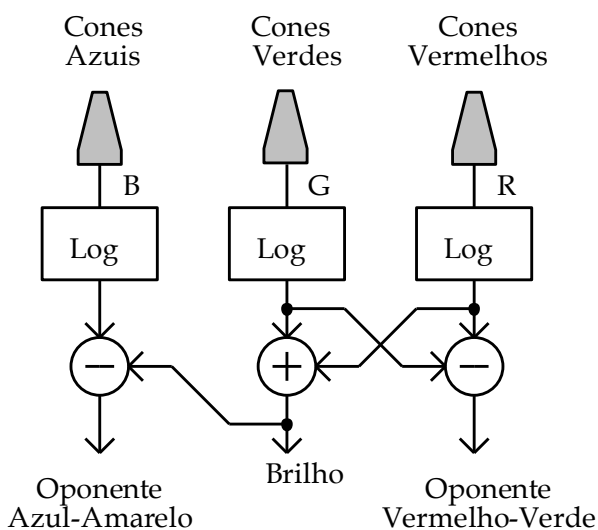


Fig. 2.1 - Modelo de Oponentes para Visão a Cores

de onda. A percepção visual correspondente à sensação de cor depende da relação entre os estímulos recebidos dentro dessas 3 regiões.

Um modelo proposto para esta percepção, denominado modelo das *Oponentes* para visão fotópica, está esquematizado na figura 2.1. Segundo este modelo, dois espectros luminosos diferentes, que gerassem os mesmos valores dos estímulos R, G e B, seriam percebidos como cores idênticas. Este modelo explica ainda as características diferenciadas de vários aspectos da percepção visual, como, por exemplo, as diferentes resoluções espaciais para estímulos de luminância e tonalidade de cor, além das características de certas

Uma estimativa [Smith, Pokorny e Boyton] da resposta espectral dos 3 tipos de células, $F_R(\lambda)$, $F_G(\lambda)$ e $F_B(\lambda)$, é apresentada na figura 2.2. Nessa figura, as curvas estão normalizadas para mesma amplitude máxima; sabe-se, entretanto, que a sensibilidade dos cones "verdes" é cerca de 30 vezes maior que a sensibilidade dos cones "azuis", e aproximadamente 5% maior que a dos "vermelhos". É por isso que, no modelo da fig. 2.1, o canal azul (B) não contribui para a informação de "brilho", mas apenas para o atributo de tonalidade oponente azul-amarelo.

Podemos ainda observar que as respostas espectrais das células "verdes" e "vermelhas" se superpõem consideravelmente, o que traz restrições quanto à tentativa de simular qualquer cor possível utilizando apenas um conjunto finito de estímulos primários.

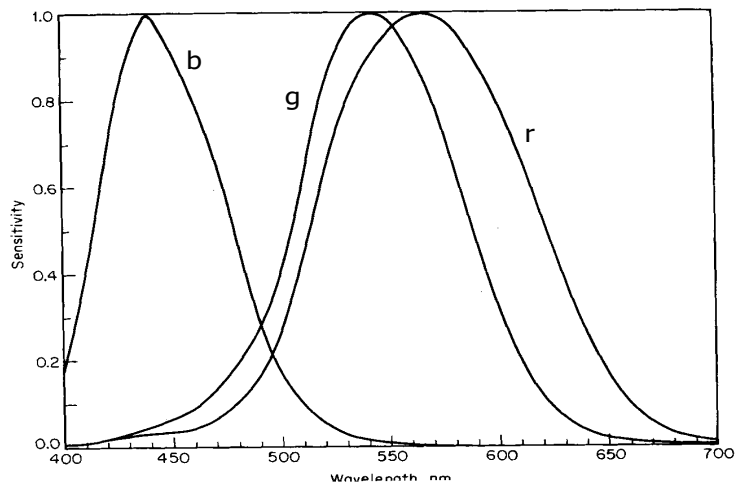


Fig. 2.2 - Sensibilidade espectral (médias, normalizada) para os três tipos de cones na retina humana

3. Reprodução de Cores: Colorimetria

A *Colorimetria* consiste na reprodução de uma cor qualquer através da combinação de um conjunto de cores primárias. No processo **subtrativo** (utilizado em artes gráficas, impressoras e filmes coloridos) são utilizados pigmentos que absorvem determinados comprimentos de onda; por exemplo, *Ciano* (absorve o vermelho), *Magenta* (absorve verde) e *Amarelo* (absorve azul). A mistura dos três pigmentos resultaria na cor preta. Já no processo **aditivo**, fluxos luminosos primários são misturados de forma a proporcionar a mesma sensação visual de uma determinada cor. Experimentalmente determinou-se que a mistura de fluxos luminosos coloridos é linear e aditiva (leis de **Grassman**, 1853).

O **colorímetro** é então um dispositivo que procura reproduzir uma cor qualquer por mistura aditiva, através de algum processo; por exemplo:

- a) Através da combinação ponderada de um fluxo luminoso F_λ monocromático, com comprimento de onda λ , e um fluxo F_W de luz branca (com distribuição espectral uniforme). Este método, representado na figura 3.1-(a), é conveniente para podermos definir o *Comprimento de Onda Dominante* da cor obtida como sendo λ , a *Luminância* como $F = F_W + F_\lambda$ e a *Pureza Espectral* como sendo

$$p_C = \frac{F_\lambda}{F} = \frac{F_\lambda}{F_W + F_\lambda}$$

- b) Pela combinação ponderada de três estímulos monocromáticos adequadamente escolhidos, como representado na figura 3.1-(b) (*reprodução tricromática*). Por exemplo, podemos usar vermelho, verde e azul (**R, G, B**). Dizemos então que uma cor **C** é dada pela combinação de $R + G + B$ unidades de luminância respectivamente dos primários **R, G e B**.

$$C = RR + GG + BB$$

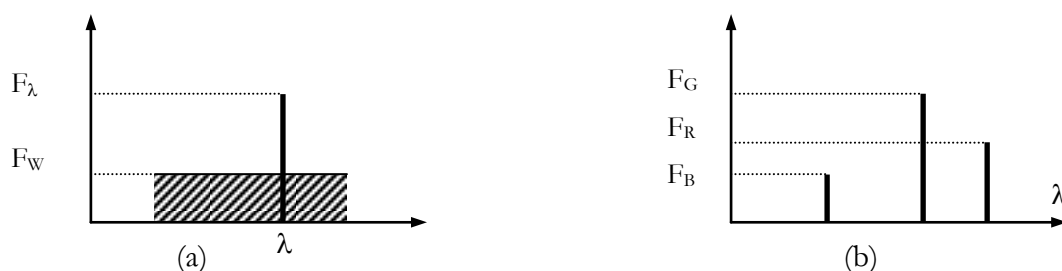


Fig. 3.1 – Dois Processos de Colorimetria

Caso estejamos interessados apenas na *Cromaticidade* de uma cor, ou seja, apenas nos atributos de Tonalidade e Saturação, independentemente do Brilho, podemos **normalizar** os valores obtidos em relação à soma total dos estímulos, ou seja:

$$r = \frac{R}{R + G + B}$$

$$g = \frac{G}{R + G + B}$$

$$b = \frac{B}{R + G + B} = 1 - r - g$$

Dizemos que r e g são as *coordenadas de cromaticidade* da cor em questão, enquanto que R , G e B são os seus *valores tri-estímulos*. A coordenada b é redundante e pode ser ignorada.

Na prática, os métodos descritos acima permitiriam reproduzir todas as cores possíveis apenas se admitirmos valores negativos para algum parâmetro. No método (a), as cores púrpuras (violeta, magenta) seriam obtidas com comprimento de onda dominante na região do verde (correspondente à cor complementar), mas com amplitude negativa; já no método (b), algumas tonalidades saturadas de verde azulado necessitam de valores negativos para a componente R . Esta é uma consequência da superposição das curvas de sensibilidade das células da retina, conforme apontado na fig. 2.2.

3.1 Funções de Cromaticidade

A figura 3.2 mostra as *Funções de Cromaticidade* $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ e $\bar{b}(\lambda)$ para um observador padrão. Estas funções correspondem aos valores tri-estímulos obtidos na colorimetria tricromática das cores puras (espectrais), usando estímulos primários em 700nm (**R**), 546.1 nm (**G**) e 435.8 nm (**B**); e foram estabelecidas pela CIE (*Comission Internationale de l' Eclairage*) em 1931.

Dada então uma fonte qualquer com distribuição espectral de potência luminosa $P(\lambda)$, os valores tri-estímulos R , G e B necessários para a reprodução tricromática da cor dessa fonte serão obtidos por:

$$R = \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda$$

$$G = \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda$$

$$B = \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda$$

As intensidades individuais dos estímulos unitários de **R**, **G** e **B** são escolhidas de modo que $1\mathbf{R} + 1\mathbf{B} + 1\mathbf{C}$ equivale à cor branca, com distribuição espectral de potência plana entre 780 e 380 nm. A tabela abaixo mostra valores relativos de luminância e de potência radiante, necessários para cada estímulo unitário nos comprimentos de onda escolhidos.

Estímulo Unitário	Luminância relativa (nits)	Potência relativa (watts)
1R (700 nm)	0.1769	43.162
1G (546.1 nm)	0.8124	0.8252
1B (435.8 nm)	0.0107	0.5989

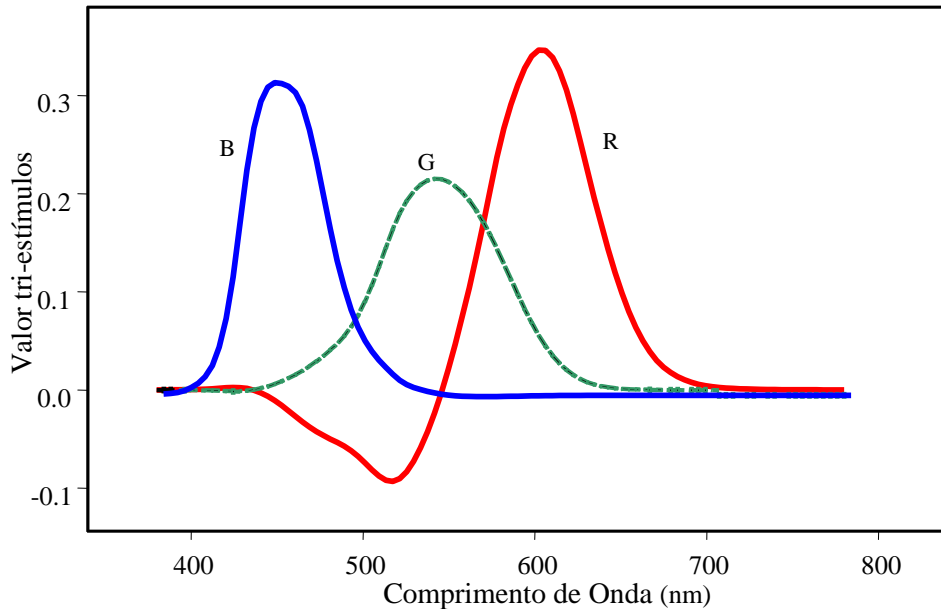
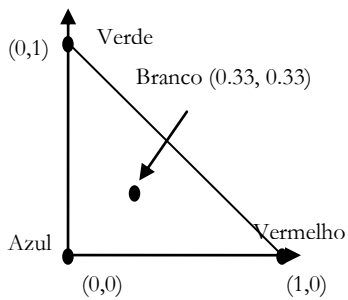


Fig. 3.2 - Funções de Cromaticidade para Observador Padrão (CIE-1931) usando estímulos em 700nm, 546,1nm e 435,8nm.



Todas as combinações realizáveis dos três estímulos primários **R**, **G**, **B**, possuem coordenadas de cromaticidade contidas em um triângulo, denominado *diagrama de cromaticidade r-g*, cujos vértices correspondem respectivamente às 3 cores primárias saturadas (verde, vermelho e azul). A cor branca situa-se no baricentro do triângulo, nas coordenadas $r = g = 0.3333$.

O lugar geométrico das coordenadas correspondentes às cores puras do espectro, caso fosse representado no diagrama de cromaticidade *r-g*, descreveria uma figura em forma de ferradura (fig. 3.3). Algumas cores contidas nesta região, particularmente os comprimentos de onda entre 440 e 540 nm, necessitam de valores negativos em *r* para sua adequada reprodução colorimétrica.

A representação *r-g* possui alguns inconvenientes, como pouca homogeneidade e precisão na distinção de cores. Em 1955, a CIE desenvolveu uma representação baseada em estímulos hipotéticos **X**, **Y** e **Z**, cujas coordenadas no sistema *r-g* estão indicadas na figura 3.3. Estes estímulos foram escolhidos de modo que o parâmetro *Y* corresponda à luminância, enquanto que *X* e *Z* correspondem a estímulos de luminância zero (que afetam apenas a *crominância* da cor). As funções de cromaticidade $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$ correspondentes a esses estímulos, mostradas na figura 3.4, possuem valores sempre positivos. Note que a função $\bar{y}(\lambda)$ é igual à Função de Luminância usada em Fotometria. A figura 3.5 mostra as cores reais (espectrais e não-saturadas) representadas no *diagrama de cromaticidade x-y*, onde as coordenadas *x* e *y* são normalizadas da forma:

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

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

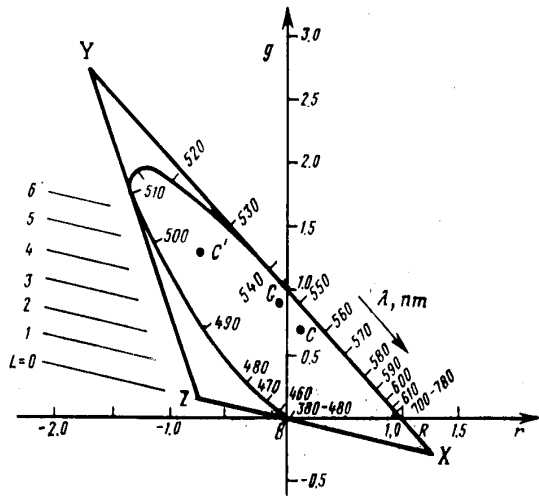


Fig. 3.3 - Cores espectrais e estímulos X, Y e Z no diagrama de cromaticidade r-g

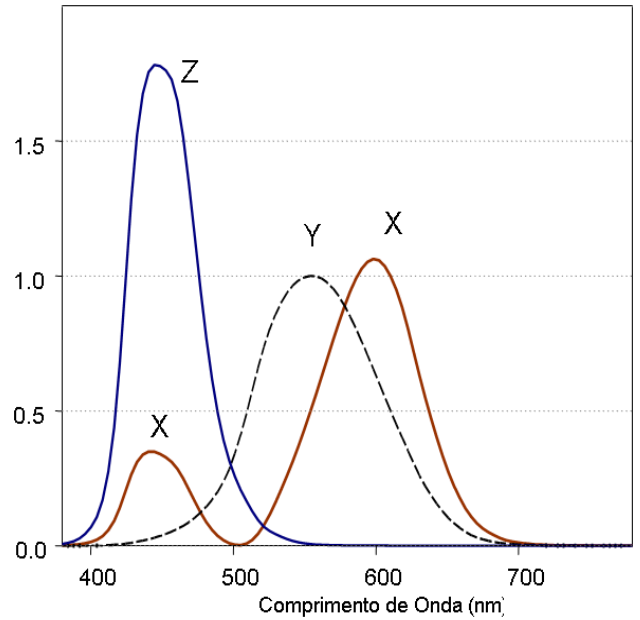


Fig. 3.4 - Funções de Cromaticidade no Sistema CIE - X, Y, Z

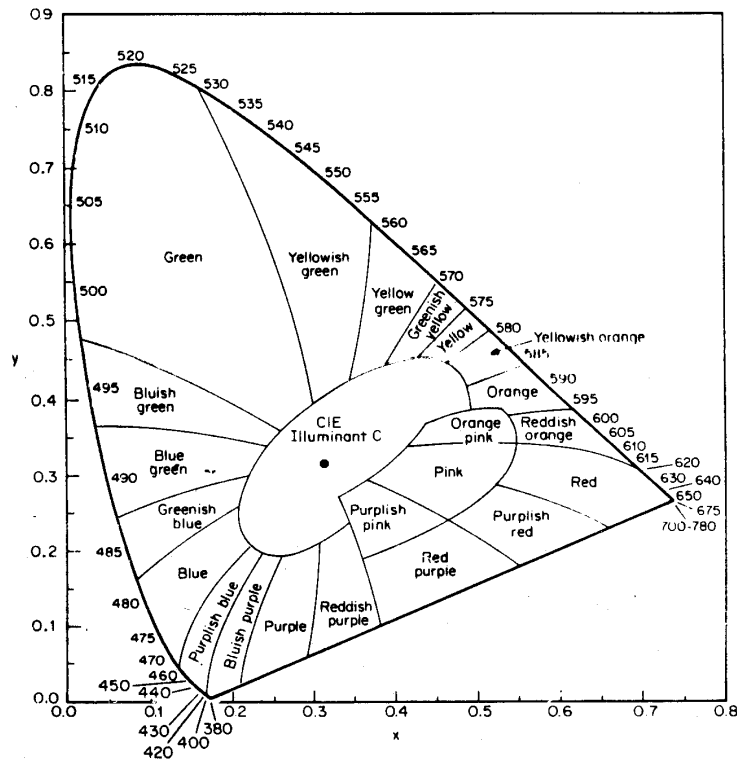


Fig. 3.5 - Diagrama de Cromaticidade CIE x-y

Neste diagrama, a cor branca (com densidade espectral de potência uniforme) possui coordenadas $x = y = 0.3333$.

Os valores tri-estímulos podem ser convertidos entre os sistemas **R, G, B** e **X, Y, Z** pelas seguintes expressões:

$$\begin{aligned} X &= 0.490R + 0.310G + 0.200B \\ Y &= 0.177R + 0.813G + 0.011B \\ Z &= 0.000R + 0.010G + 0.990B \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R &= 2.365X - 0.897Y - 0.468Z \\ G &= -0.515X + 1.426Y + 0.089Z \\ B &= 0.005X - 0.014Y + 1.009Z \end{aligned}$$

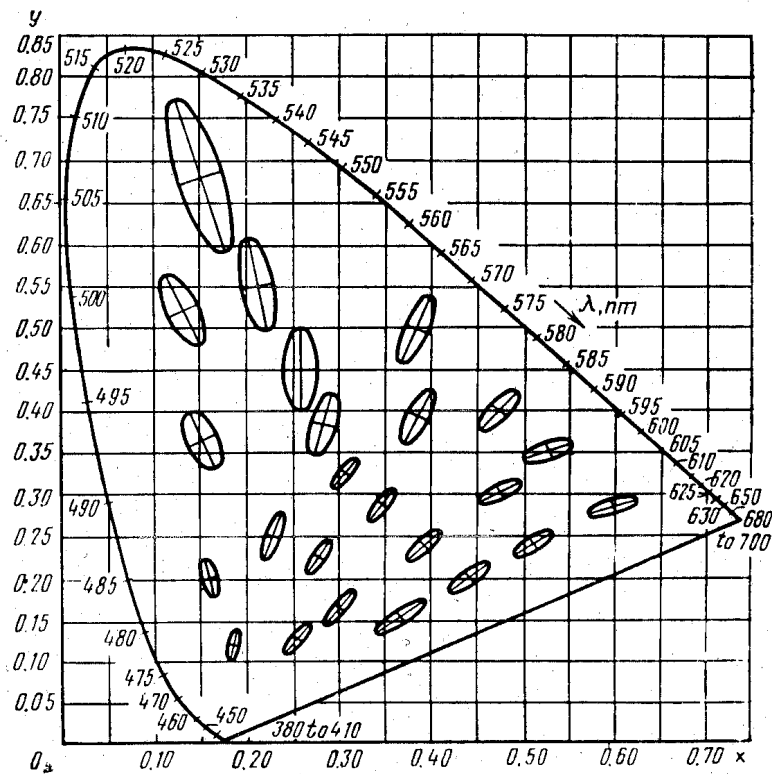


Fig. 3.6 - Elipses de Percepção de Diferenças de Cromaticidade

Na figura 3.6 temos uma representação de elipses de diferenças constantes de percepção de cromaticidade no diagrama x - y (o contorno de cada elipse corresponde a cromaticidades distanciadas do centro por 6 passos de diferença apenas perceptível). Vemos que, mesmo nessa representação, a percepção de cor não é uniforme em todas as regiões de cromaticidade.

4. Reprodução de Cores na TV

Os objetivos de um sistema de reprodução de cores podem ser classificados dentro de uma série de graus de fidelidade:

- *Fidelidade Física*: consistiria em reproduzir exatamente a composição espectral do fluxo luminoso emanado pela imagem original (obviamente impraticável);
- *Fidelidade de Valores Tri-estímulos*: consistiria em reproduzir na visão os mesmos valores absolutos dos estímulos primários (ainda impraticável devido à extensa faixa de luminâncias que o receptor deveria reproduzir);
- *Fidelidade Colorimétrica*, ou seja, reproduzir adequadamente as coordenadas colorimétricas da imagem original, atenuando ou amplificando a luminância de acordo com a faixa dinâmica do receptor (é a meta do sistema de TV; porém, diferenças nas condições ambientes e referências de branco, além de erros na correção Gama, restringem esta implementação);
- *Reprodução Correspondente*, onde as cores reproduzidas seriam correspondentes às originais desde que a imagem original fosse iluminada com a mesma referência de branco e com o mesmo nível de luminância proporcionados pelo receptor (viável);
- *Fidelidade Subjetiva*, levando em conta que o espectador prefere certos objetos com cores mais saturadas de que na realidade (o receptor deve permitir ajustes).

O "display" num receptor típico de TV a cores possui 3 fontes primárias, R_D , G_D e B_D ; cada elemento de imagem equivale a um colorímetro onde é feita uma reprodução tri-cromática através das componentes R , G e B . Estes estímulos situam-se nos vértices de um triângulo no diagrama $x-y$, sendo que, devido à linearidade das operações aditivas nas cores, todas as tonalidades que podem ser sintetizadas pelo receptor estarão contidas nesse triângulo. Por exemplo, na figura 4.1 estão indicados os primários adotados pelo NTSC (*National Television System Committee*) para cinescópios. O espectro de emissão destes 3 primários NTSC está na figura 4.2.

Na figura 4.1 vemos representadas ainda as cromaticidades características de corantes, tintas e pigmentos, indicando que a fidelidade de cores conseguida por um cinescópio é adequada para representação de objetos usuais.

Nessa mesma figura estão também indicados os primários adotados mais recentemente (P22) que, apesar de proporcionarem qualidade inferior na reprodução de cores, são preferidos devido à sua maior eficiência luminosa.

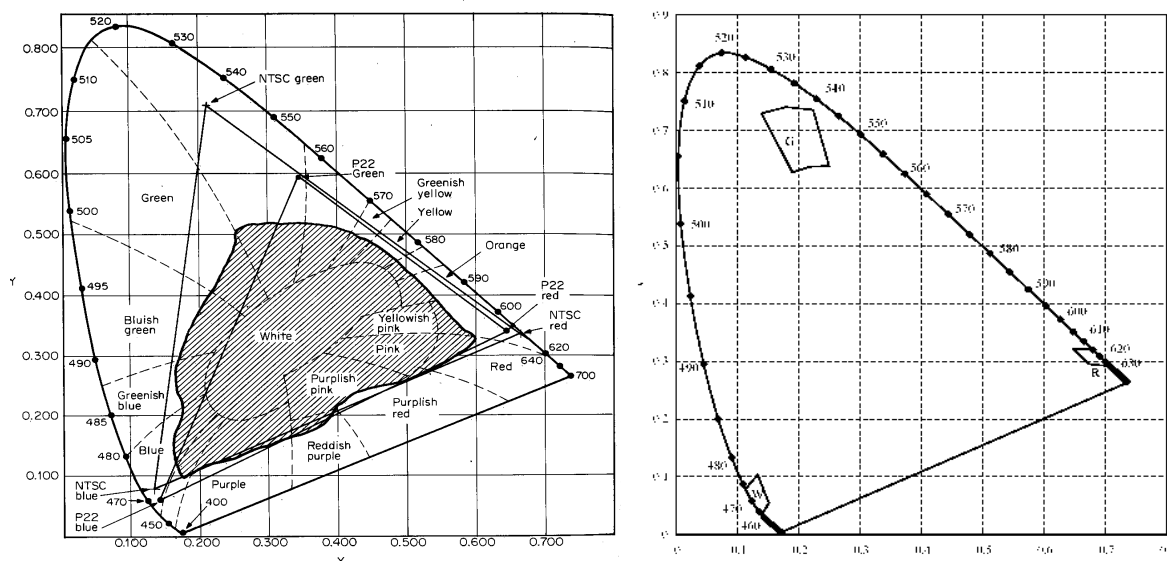


Fig. 4.1 - Primários NTSC, P22 e Cores Reais; Primários LED RGB

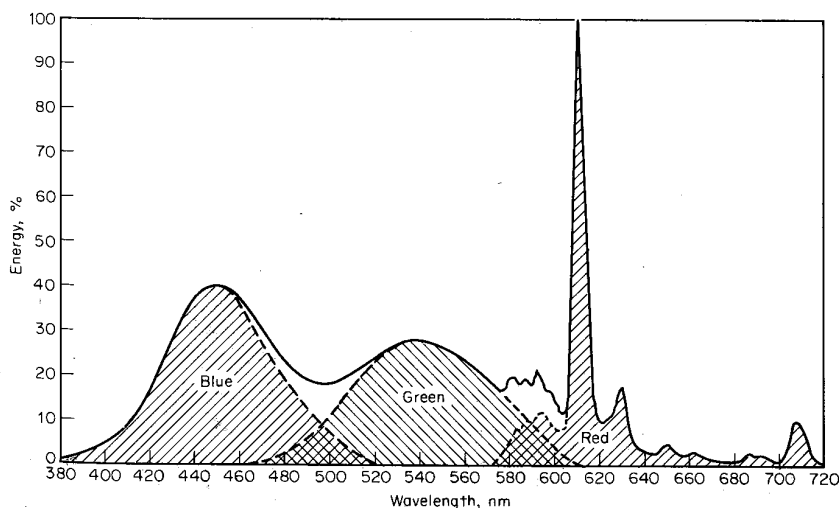


Fig. 4.2 - Densidade Espectral de Potência para Primários NTSC Típicos (para mesma densidade de corrente)

5. Captura de Imagens Coloridas na TV

Um sistema de TV a cores depende fundamentalmente de uma câmera que seja capaz de efetuar a análise colorimétrica da imagem capturada. Para cada elemento da imagem, devem ser gerados os 3 estímulos (R , G , B) que serão reproduzidos no receptor. Para isso, são necessários 3 canais ópticos independentes, com sensibilidades espectrais iguais às funções de cromaticidade $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ e $\bar{b}(\lambda)$ relativas aos estímulos primários usados no receptor. Na figura 5.1 temos as curvas de sensibilidade ideais, correspondentes aos primários NTSC e EBU (*European Broadcast Union*).

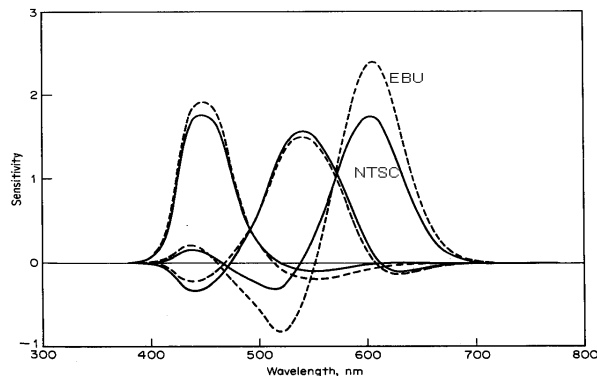


Fig. 5.1 - Sensibilidades Espectrais Ideais Correspondentes a Primários NTSC e EBU

Um sistema de TV a cores contém os elementos apresentados no diagrama de blocos simplificado da figura 5.2. Em certos tipos de câmeras, a imagem original é focalizada por uma lente e dividida em 3 feixes através de um prisma semi-reflexivo ou de espelhos dicróicos (que refletem determinadas faixas de comprimentos de onda e são transparentes para as faixas complementares). Cada um dos feixes passa por filtros corretores, cuja função é ajustar a resposta espectral de cada canal óptico, aproximando-a da correspondente curva ideal de sensibilidade. São então projetadas imagens em 3 sensores independentes, que geram, através de varredura, sinais elétricos proporcionais à luminância dos elementos da imagem, dentro de cada banda espectral.

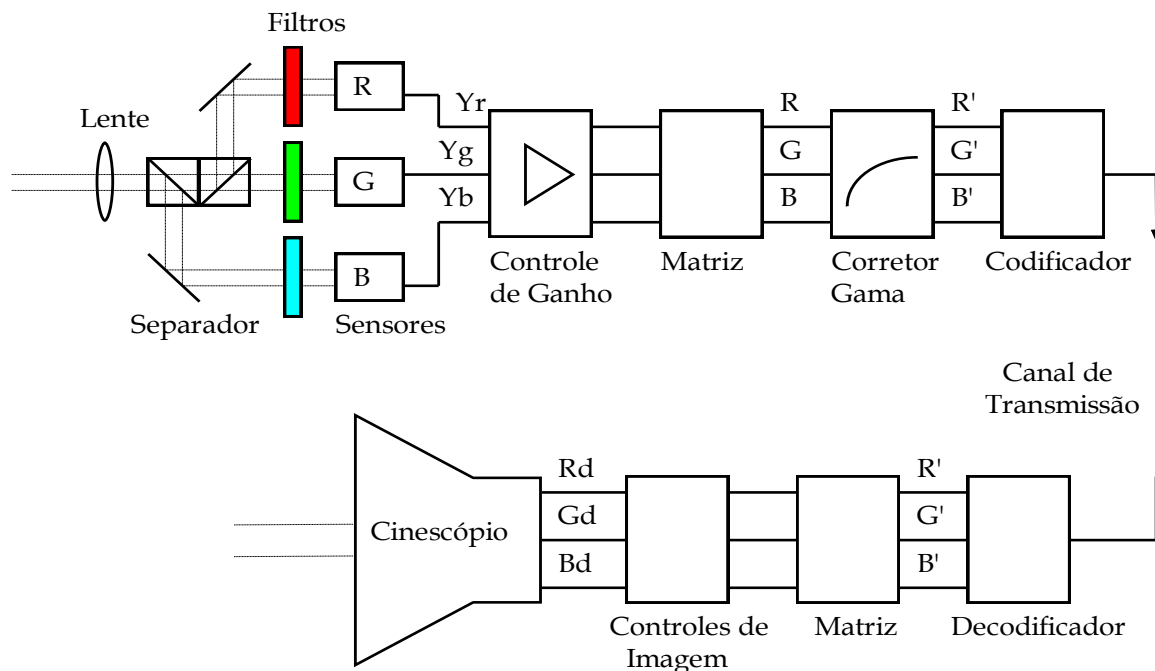


Fig. 5.2 - Diagrama em Blocos Simplificado de um Sistema de TV a Cores

Os sinais elétricos são amplificados e ajustados para equilibrar as sensibilidades dos sensores; a seguir são aplicados a uma matriz que permite corrigir a resposta espectral e sintetizar os lóbulos negativos presentes nas curvas da fig. 5.1. Os sinais de luminância resultantes sofrem correção Gama, para compensar a não-linearidade do cinescópio no receptor, produzindo as componentes R' , G' e B' . O fator γ no receptor pode ser igual a 2,2 (NTSC), 2,8 (PAL europeu), 2,22 (TV digital), embora na prática seja adotado frequentemente $\gamma = 2,5$.

Estes sinais são codificados de maneira adequada para serem transmitidos pelo canal de comunicação adotado. No receptor, os sinais R' , G' e B' são decodificados, combinados por uma matriz ajustável (que permite controlar a saturação), sofrem regulagens de ganho e "offset" (contraste e brilho) e são aplicados ao dispositivo de visualização. No caso do cinescópio, a resposta não-linear deste (compensada pela correção Gama no transmissor) proporciona uma luminância reproduzida que corresponde à luminância da imagem original.

Evidentemente, outros dispositivos de exibição de imagem que apresentem resposta linear (por exemplo, displays LED ou plasma) devem incorporar circuitos que realizem a correção gama inversa, mantendo a compatibilidade com o sinal transmitido.

Nas descrições a seguir, os sinais R' , G' , B' , Y' , C'_r , C'_b etc. devem ser entendidos como sinais já corrigidos pelo fator γ , embora sejam vulgarmente denominados de "Luminância", "Crominância", etc.

6. Codificação Tricromática para Transmissão

A função do Codificador na fig. 5.2 é de permitir a transmissão de 3 sinais independentes por um único canal de comunicação. Os primeiros sistemas propostos utilizavam transmissão sequencial: a imagem era dividida em 3 campos consecutivos, cada um correspondendo a uma cor primária. Requisitos de compatibilidade cruzada entre receptores e transmissores coloridos e monocromáticos fizeram com que fosse adotado um sistema de modulação em sub-portadora, aproveitando os seguintes fatos:

- a) A visão humana é menos sensível a detalhes de crominância do que de luminância, para altas frequências espaciais;
- b) Pelo fato do sinal de vídeo composto ser quase-periódico, o seu espectro possui raias concentradas nos múltiplos da frequência horizontal. Há espaços vazios entre essas raias;
- c) A maior parte da energia do sinal de vídeo composto está normalmente concentrada nas baixas frequências (abaixo de 1 MHz).

Para haver compatibilidade com receptores monocromáticos, é necessário reconstruir um sinal de vídeo proporcional à luminância, a partir dos sinais R' , G' e B' . Considerando a contribuição relativa de cada um dos primários padronizados, para a sensação de luminância, inicialmente é criado um sinal de *Luminância*. No caso do sistema NTSC, obedece à expressão:

$$Y' = 0.299 R' + 0.587 G' + 0.114 B'$$

A seguir são gerados dois sinais de *Crominância*, que carregam a informação de cor:

$$C_R = (R' - Y') \quad \text{e} \quad C_B = (B' - Y').$$

Estes sinais correspondem grosso modo aos *Oponentes* verde-vermelho e azul-amarelo.

A estratégia para esta representação é que a banda passante necessária para transmissão dos sinais de crominância pode ser muito menor que a necessária para o sinal Y' (luminância). Na figura 6.1 vemos resultados de testes efetuados pelo NTSC, que demonstraram que 1.3 MHz é adequado para as componentes de crominância, para composição de uma imagem satisfatória (TV convencional) no receptor.

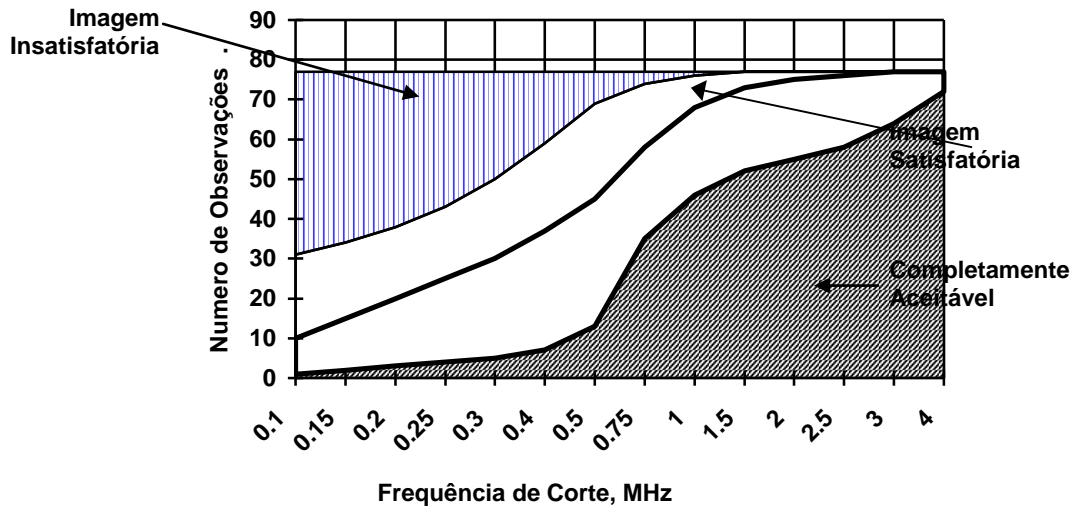


Fig. 6.1 - Testes Subjetivos de Requisitos de Banda Passante

7. Sistema NTSC (National Television Standards Committee)

O primeiro sistema compatível de TV a cores, padronizado em 1953 (figura 7.1), transmite os sinais de crominância modulados por DSB em quadratura, através de uma sub-portadora na frequência $f_{SC} = 3.579545$ MHz. Os sinais $(R' - Y')$ e $(B' - Y')$ são antes combinados em sinais I' e Q' (em fase e em quadratura) pelas expressões

$$I' = 0.74 (R' - Y') - 0.27 (B' - Y') = 0.60 R' - 0.28 G' - 0.32 B'$$

$$Q' = 0.48 (R' - Y') + 0.41 (B' - Y') = 0.21 R' - 0.52 G' + 0.31 B'$$

O sinal I' , representando crominância na direção ciano / vermelho, é limitado em banda em aproximadamente 1.5 MHz, enquanto Q' , representando a direção azul / amarelo (na qual o olho é menos sensível a detalhes), é limitado em 0.5 MHz. A amplitude máxima do sinal Q' é menor que a do sinal I' , de forma a minimizar a amplitude total do sinal de vídeo composto (especialmente para as cores amarelo e azul).

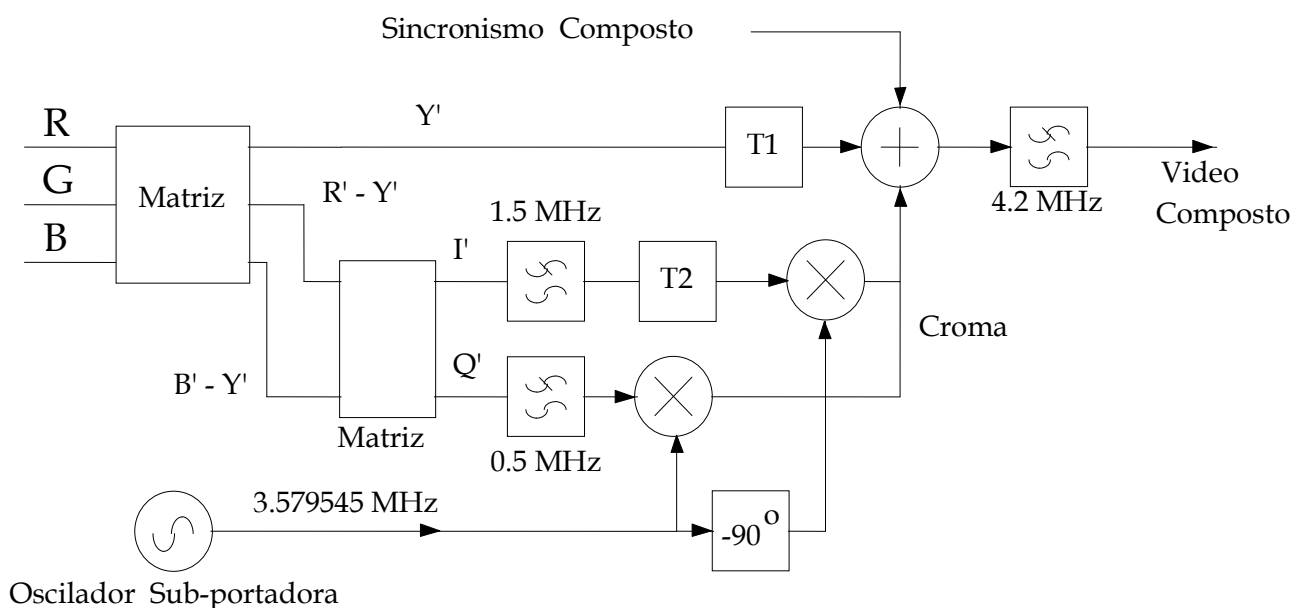


Fig. 7.1 - Modulador NTSC

O sinal de cromaticidade, modulado por DSB em quadratura (denominado "croma"), carrega a informação de cromaticidade da imagem; em relação à sub-portadora, pode-se dizer que a sua fase corresponde à tonalidade da cor ("hue") e sua amplitude corresponde à saturação.

Cores neutras (preto, cinza, branco) possuem cromaticidade zero, e são transmitidas de forma idêntica à da televisão monocromática, uma vez que o sinal de cromaticidade utiliza modulação DSB com portadora suprimida.

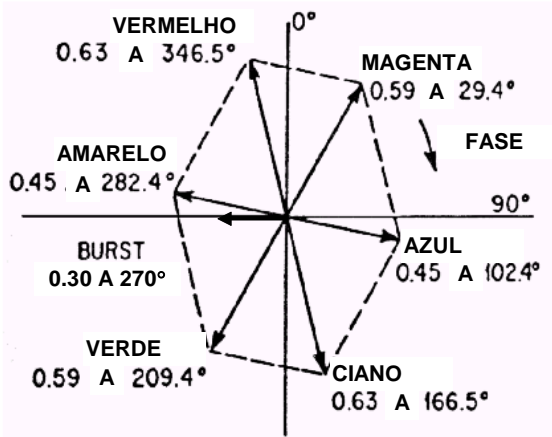


Fig. 7.2 - Diagrama Vetorial do Sinal de Crominância

Para que o receptor possa demodular corretamente um sinal em DSB-quadratura, é necessário transmitir uma referência de fase da portadora original. Essa referência é enviada durante o retraço horizontal, na forma de um pequeno trecho (aproximadamente 10 ciclos) de sub-portadora, com fase de 57° em relação ao sinal I' , denominado "burst" (rajada).

As linhas de retardo T1 e T2 (fig. 7.1) compensam os atrasos que serão proporcionados pelos filtros dos sinais I' e Q' , tanto no transmissor como no receptor, de modo que os sinais demodulados coincidam no tempo com o sinal de luminância.

As amplitudes e fases das composições vetoriais de I' e Q' , para as cores primárias e compostas, estão apresentadas na figura 7.2.

A frequência da sub-portadora foi escolhida de modo a não haver superposição dos espectros do sinal de luminância e do sinal de cromaticidade (intercalamento espectral). Para isso, f_{sc} deve ser um múltiplo ímpar da metade da frequência horizontal. No caso do NTSC, adotou-se $f_{sc} = 455/2 \times f_h = (5 \times 7 \times 13 / 2) \times f_h$.

A figura 7.3 mostra a distribuição das várias componentes do sinal NTSC no espectro de radiodifusão, mantendo a ocupação de 6 MHz correspondente ao canal nominal.

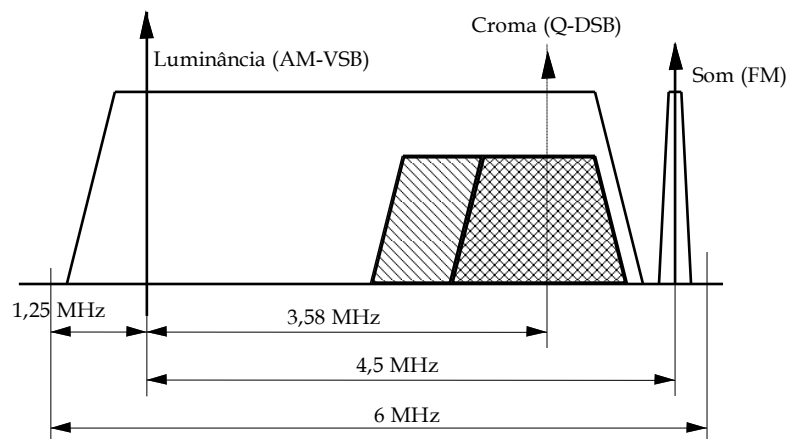


Fig. 7.3 - Ocupação Espectral de um sinal de Radiodifusão NTSC

Devido à proximidade da sub-portadora de cor com a portadora de áudio, pode ocorrer batimento entre estas duas componentes no receptor, gerando uma interferência de $4,5 - 3,58$ MHz = 920 kHz. Para reduzir a visibilidade deste batimento, é necessário forçar o intercalamento espectral desta frequência também. Ou seja, $(4,5 - f_{sc})$ deve ser também um múltiplo ímpar da metade da frequência horizontal.

Para conseguir isso, sem alterar a frequência da portadora de áudio, foi necessário mudar ligeiramente a frequência horizontal. Adotou-se um fator de correção igual a 1000/1001, que afetou todas as frequências envolvidas no sistema de transmissão de vídeo. A frequência horizontal passou de 15750 para 15734,26.. Hz, a frequência vertical passou de 60 para 59,94.. Hz e a sub-portadora de cor passou para 3,579545,45.. MHz.

8. Sistema PAL-M

O sistema NTSC sofre problemas de instabilidade de cor, especialmente quando o sinal é sujeito a defasagens não-lineares devidas à intermodulação da luminância (defeito chamado de *erro de fase diferencial*). Na tentativa de reduzir estes problemas, foi desenvolvido na Alemanha o sistema PAL (*"Phase Alternating Line-rate"*). Este sistema foi planejado para o padrão europeu (50 Hz, com largura de canal de 8 MHz). No Brasil, por utilizarmos o padrão M de transmissão monocromática, com canal de 6 MHz, optamos por desenvolver uma variante do PAL europeu, denominada PAL-M. O diagrama de blocos do Modulador PAL-M é apresentado na figura 8.1.

Nesse sistema, padronizado em 1972, são criados os seguintes sinais de cromaticidade:

$$U' = 0.493 (B' - Y') \quad \text{e} \quad V' = 0.877 (R' - Y')$$

Ambos são limitados em frequência em 1.5 MHz; a seguir, são modulados em DSB em quadratura, só que a polaridade do sinal V' é invertida alternadamente a cada linha de varredura.

A inversão de fase a cada linha corresponde a uma modulação por um sinal de frequência $f_H / 2$. Isso faz com que o espectro do sinal de cromaticidade adquira raias nas frequências múltiplas de $f_H / 2$, o que dificulta o intercalamento espectral com o sinal de luminância. Por isso, a sub-portadora do sistema PAL-M é igual a um múltiplo ímpar de um quarto da frequência horizontal; no caso, $f_{sc} = 909/4 f_h = 3,575611$ MHz.

No receptor há um circuito de retardo, que proporciona ao sinal de cromaticidade um atraso igual à duração de uma linha. É efetuada então a média da cromaticidade transmitida em linhas consecutivas; desta forma, um erro de fase em uma determinada direção é compensado pela alternância de fase, resultando apenas em uma redução de saturação da imagem.

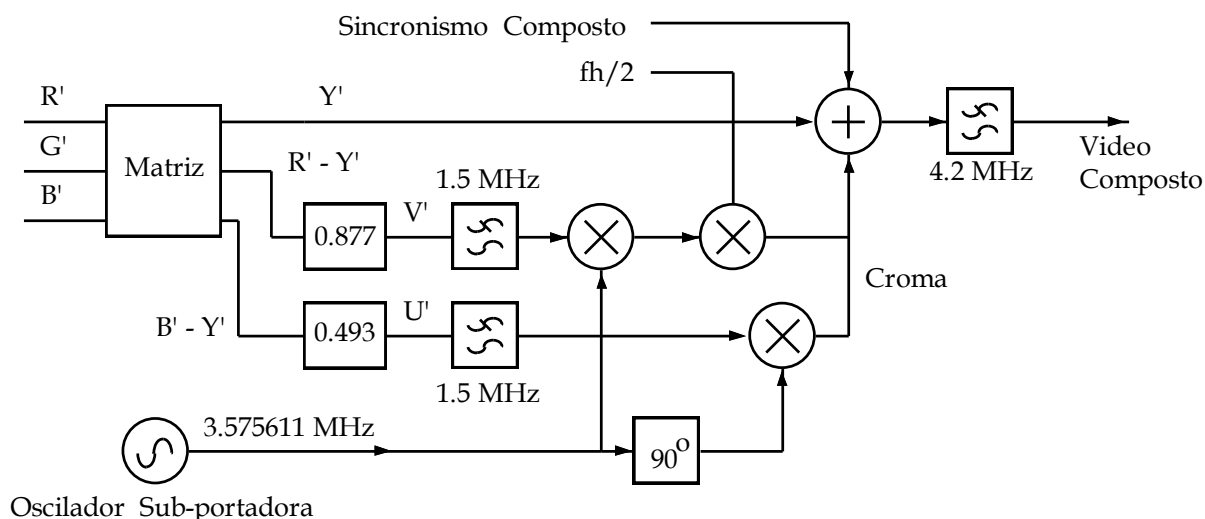


Fig. 8.1 - Modulador PAL-M

A figura 8.2 mostra as formas de onda presentes no modulador PAL-M; as amplitudes são dadas em unidades IRE. Neste exemplo o sinal de vídeo corresponde a um padrão de barras verticais, obtidas pelas 8 combinações possíveis dos 3 primários (na sequência: branco, amarelo, ciano, verde, magenta, vermelho, azul e preto). Para uma amplitude de 75% nas componentes

R, G e B, o sinal composto atinge pico de 100 IRE. Para amplitudes de 100%, pode ocorrer sobremodulação; por isso é necessário limitar a saturação das cores de alta luminosidade.

Na figura 8.3 temos o espectro de um sinal de TV em radiodifusão; podemos observar a concentração de energia em torno das portadoras de vídeo e áudio, e da sub-portadora de cor (3.58 MHz acima da portadora de vídeo).

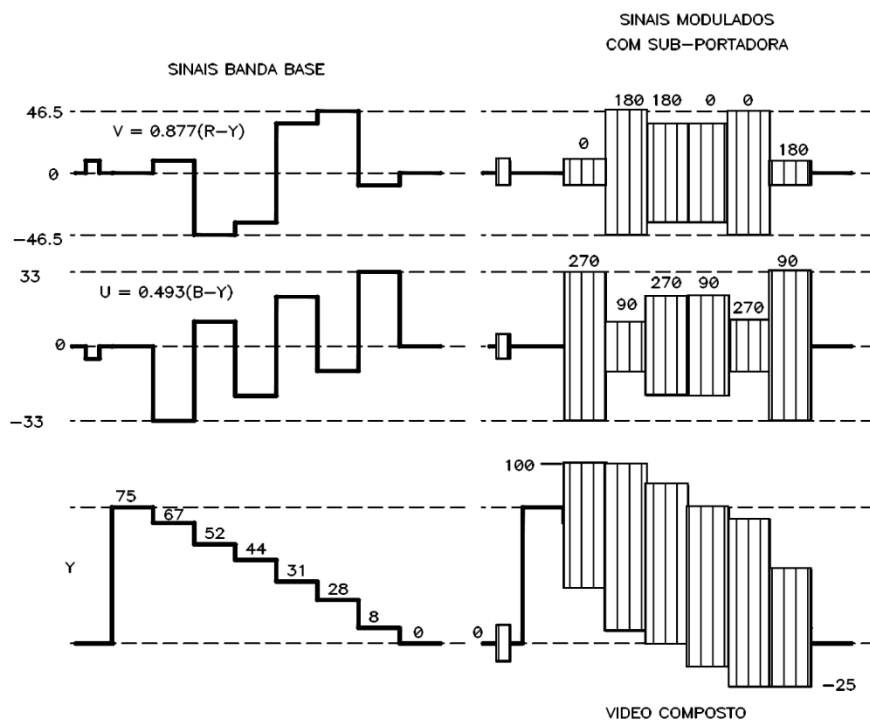


Fig. 8.2 - Formas de Onda no Modulador PAL-M
(Padrão de Barras a 75% - amplitudes em IRE; fases em graus)

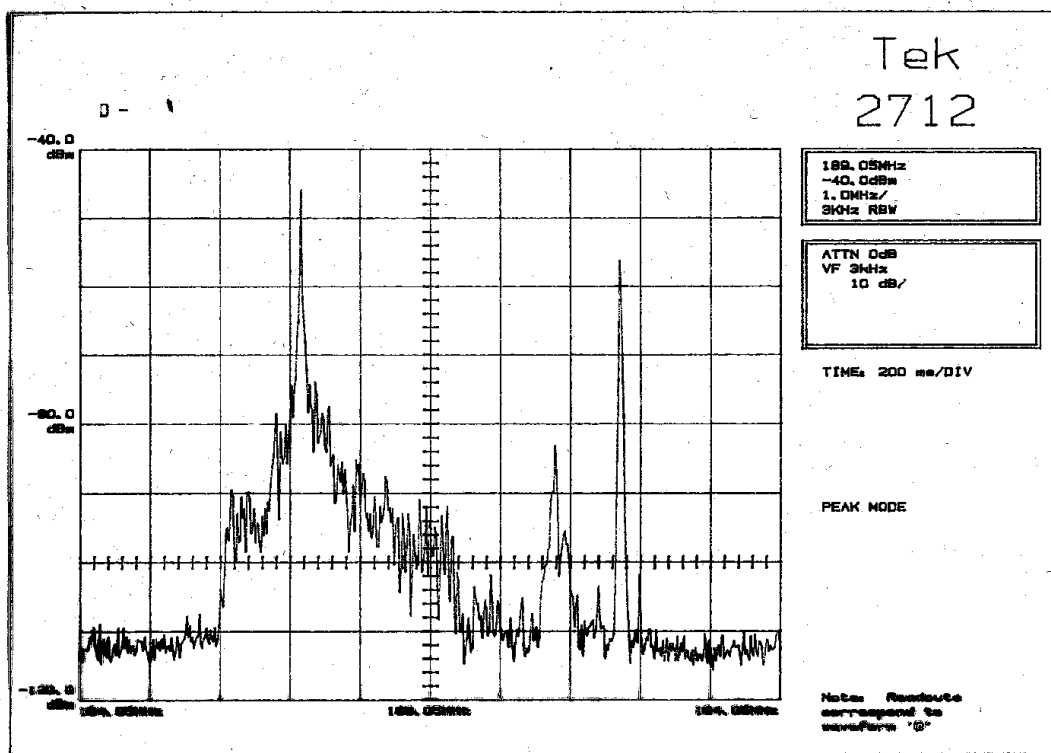


Fig. 8.3 - Espectro de Radiodifusão de TV (PAL-M)

9. Outros Padrões de Transmissão e Codificação de TV analógica a Cores

9.1 SECAM (Séquential Couleur Avec Mèmoire) :

Este sistema foi desenvolvido conjuntamente pela França e União Soviética, e inaugurado em 1967; aqui a transmissão dos sinais de crominância é feita alternadamente a cada linha, utilizando sub-portadoras moduladas em FM. A componente R'-Y' possui frequência central de 4.40625 MHz ($282 \times f_H$) com desvio máximo de +350 / -506 kHz, e a B'-Y' de 4.2500 MHz ($272 \times f_H$) com desvio máximo de +506 / -350 kHz. Os sinais de crominância sofrem pré-ênfase antes da modulação, e as portadoras moduladas também sofrem correção de amplitude ao se afastarem das frequências centrais.

O sistema é relativamente insensível a distorções de fase no canal de transmissão; no entanto, uma vez que não há intercalamento espectral, a extração do canal de luminância no receptor é feita por um filtro passa-baixas em 3 MHz, o que prejudica a resolução da imagem.

Algumas variantes do sistema SECAM utilizam modulação positiva da portadora de vídeo, e/ou portadora de áudio modulada em AM.

9.2 PAL Europeu (B / G / H / I) :

Sistema otimizado para 50 Hz / 625 linhas, inaugurado na Alemanha em 1969; utiliza sub-portadora de 4,433618 MHz para crominância. A banda passante do sinal de luminância é de 5 MHz (padrões B/G/H) ou 5,5 MHz (padrão I), para canais de 7 MHz (B) ou 8 MHz (G/H/I). Diferentemente do sistema PAL-M, a sub-portadora de crominância possui intercalamento espectral com a frequência vertical também:

$$f_{sc} = \frac{1135}{4} f_H + \frac{1}{2} f_v$$

9.3 PAL-N ("Narrow-band") :

Variante do sistema PAL, usado na Argentina, Paraguai e Uruguai, onde a frequência vertical é 50 Hz mas a banda alocada para radiodifusão é de 6 MHz por canal. A sub-portadora de cor situa-se em 3,582056 MHz, e a banda passante da luminância é de 4,2 MHz. Este sistema proporciona resolução espacial diferente nas direções horizontal e vertical.

9.4 Super-Video :

Este é um padrão de distribuição de vídeo em banda-base, no qual os sinais de luminância (Y' + Sincronismo composto) e Croma (I', Q' e "burst" modulados em 3,58 MHz) trafegam independentemente por cabos separados. A vantagem é que, não havendo necessidade de filtros no receptor para separar luminância e crominância, a resolução de imagem é superior e as modulações cruzadas praticamente inexistem. O sinal de S-Video pode usar as frequências próprias do NTSC, PAL-M, etc. É usado em equipamentos semi-profissionais.

9.5 Componentes (YUV) :

Este padrão foi bastante usado em estúdios e equipamentos profissionais analógicos, aparelhos de DVD, etc; nele, os sinais em banda base Y', (B'-Y') e (R'-Y') são conduzidos por 3 cabos

individuais. As amplitudes dos sinais são similares a um sinal de vídeo composto (~1 Vpp em 75 Ohms). O sinal Y' carrega também o sincronismo composto.

9.6 Colorimetria para TV Digital:

Os padrões atuais para TV digital de alta definição aderem às especificações de colorimetria descritas no padrão SMPTE 274M (*Society of Motion Pictures and Television Engineers*) e adotadas pela Recomendação ITU-R BT.709. Os primários **R**, **G** e **B** usados na colorimetria possuem as seguintes coordenadas:

Primário	x (CIE)	y (CIE)
R	0.640	0.330
G	0.300	0.600
B	0.150	0.060
Branco (referência)	0.3127	0.3290

Os valores R , G e B obtidos pela câmera, com valores variando de 0 (preto) a 1 (branco máximo), são processados por uma função não-linear (correspondente à correção Gama), como descrito na norma ITU-R BT.709:

$$V' = \begin{cases} 4.5 \cdot V & 0 \leq V \leq 0.018 \\ 1.099 \cdot V^{0.45} - 0.099 & 0.018 \leq V \leq 1 \end{cases}$$

onde V é o estímulo original (R , G ou B) e V' é o estímulo corrigido correspondente (R' , G' , B'). O sinal de luminância é obtido a partir de R' , G' , B' através da seguinte expressão:

$$Y' = 0.2126 R' + 0.7152 G' + 0.0722 B'$$

As componentes de crominância são obtidas por:

$$P_B' = \frac{0.5}{1 - 0.0722} (B' - Y') = 0,5389 (B' - Y')$$

$$P_R' = \frac{0.5}{1 - 0.2126} (R' - Y') = 0,6350 (R' - Y')$$

Os sinais P_B' e P_R' são filtrados com banda passante menor que Y' , resultando nos sinais C_R' e C_B' a serem codificados e transmitidos.

9.7 Colorimetria para UHDV:

A recomendação ITU-R BT.2020 (publicada em 2012) define novos primários R, G, B com maior abrangência em relação aos padrões SMPTE 274M e NTSC, para uso nos sistemas de ultra-alta definição (4k e 8k). As coordenadas dos primários deste sistema, denominado WCG (“Wide Color Gamut”) estão apresentadas na tabela abaixo e na Fig. 9.1:

Primário	x (CIE)	y (CIE)
R	0.708	0.292
G	0.170	0.797
B	0.131	0.046
Branco (referência)	0.3127	0.3290

A função não-linear (correção Gama) é igual à descrita no item 9.6; mas o sinal de luminância é obtido a partir de R' , G' , B' através da seguinte expressão:

$$Y' = 0.2627 R' + 0.6780 G' + 0.0593 B'$$

As componentes de cromaticidade são dadas por:

$$C_B' = \frac{1}{1.8814} (B' - Y') = 0,53152 (B' - Y')$$

$$C_R' = \frac{1}{1.4746} (R' - Y') = 0,67815 (R' - Y')$$

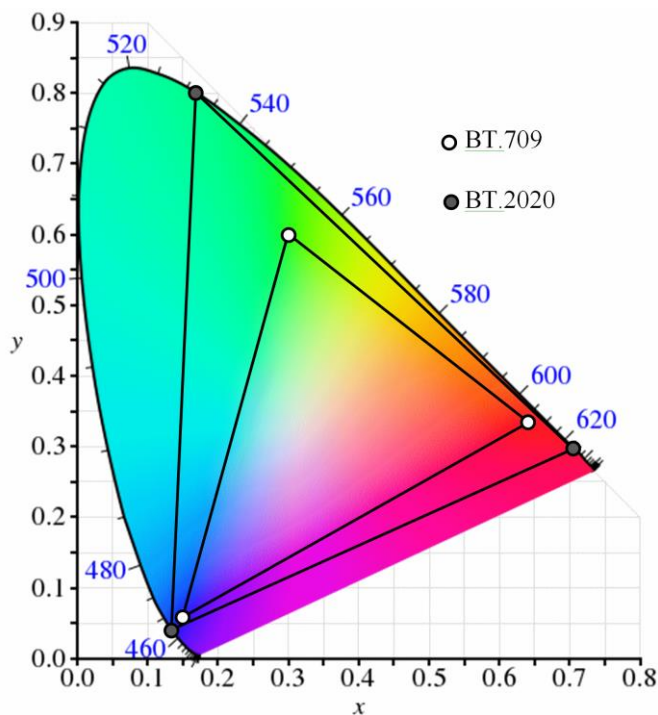


Fig. 9.1 – Coordenadas de Cromaticidade dos Primários BT.709 e BT.2020

10. Sinais de Teste para Televisão Analógica

10.1 Instrumentos de Medida para Vídeo Analógico

Os instrumentos mais importantes para medições em sinais de vídeo composto, para fins de manutenção, ajustes e controle de qualidade, são o *Monitor de Forma de Onda* e o *Vetorscópio*.

- O *Monitor de Forma de Onda* (fig. 10.1) é um osciloscópio especializado, que possui facilidades para poder sincronizar a sua varredura com as frequências vertical e horizontal. Normalmente, pode exibir uma única linha de um campo selecionado, escolhida através de contagem a partir do sincronismo vertical. Além disso, deve prover filtros passa-baixas (para remover o sinal de crominância) e passa-banda (para exibir apenas a crominância).
- O *Vetorscópio* consiste de um osciloscópio configurado para exibição X-Y, onde as deflexões horizontal e vertical são dadas pelos sinais de crominância I' e Q' , obtidos por um demodulador DSB (fig. 10.2). A imagem apresentada é, portanto, um diagrama vetorial do sinal de crominância. A fase da portadora usada na demodulação pode ser ajustada, de forma a rotacionar a imagem na tela em relação ao centro.

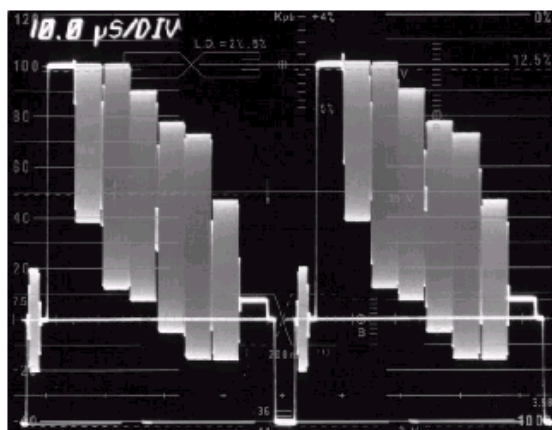


Fig. 10.1 - Sinal de Barras Coloridas em Monitor de Forma de Onda



Fig. 10.2 - Sinal de Barras Coloridas em Vetorscópio

Além disso, a manutenção e a supervisão de sistemas de vídeo dependem de equipamentos capazes de gerar formas de onda apropriadas (geradores de padrões), para efetuar medições que caracterizem isoladamente as possíveis degradações que o sinal pode sofrer ao longo do percurso entre a geração e a recepção.

Equipamentos modernos efetuam automaticamente as medições relevantes através de processamento digital do sinal de vídeo, utilizando padrões de teste pré-definidos.

Além de geradores específicos de padrões para uso em laboratório, é costume utilizar equipamentos que inserem sinais de teste no próprio sinal de vídeo que está sendo gerado e/ou transmitido. Normalmente, as primeiras linhas de uma imagem (logo após o sincronismo vertical) não são visíveis em um receptor de TV normal, pois elas estão sendo apagadas durante o retraço vertical. Nestas linhas podem então ser inseridos padrões de teste, denominados **VITS** (*“Vertical Interval Test Signal”*). O uso do VITS permite monitorar a qualidade do sinal ponta-a-ponta, durante as transmissões normais.

10.2 Degradações Características de Sinais de Vídeo

No percurso entre a geração e a recepção, os sinais de vídeo podem sofrer degradações que afetam a qualidade da imagem de formas características. Entre elas, podemos apontar:

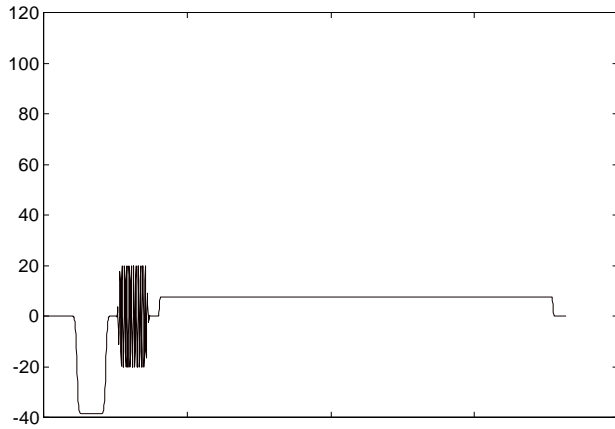
- Ruído aditivo: apresenta-se como granulação dinâmica na imagem (“chuvisco”) ou como pontos ou traços aleatórios (ruído impulsivo);
- Interferências: apresentam-se como padrões de linhas diagonais ou horizontais, em movimento;
- Limitação de banda passante: causa perda de detalhes e atenuação excessiva do sinal de crominância;
- Distorções de fase: deformam os transientes, provocando bordas múltiplas em objetos de alto contraste (oscilações amortecidas); podem ainda provocar deslocamento da crominância em relação à luminância (*atraso de croma*);
- Não-linearidade: provoca compressão de escala de cinza e perda de saturação de cor nos extremos de luminância; pode ainda provocar alterações de tonalidade de cor devido ao efeito de distorção dinâmica de fase (erro de *fase diferencial*);
- Multi-percurso: provoca superposição de imagens secundárias (“fantasmas”).

10.3 Sinais de Teste Específicos

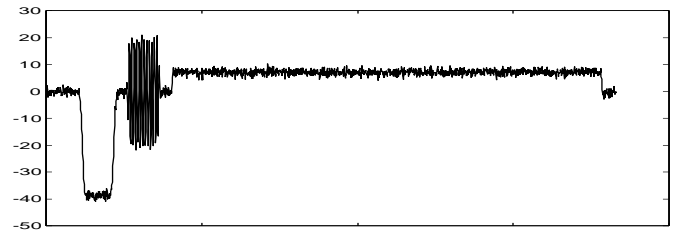
Alguns sinais de teste desenvolvidos especialmente para efetuar medidas em sistemas de vídeo estão listados a seguir.

Padrão de Teste	Aplicações
Padrão de Barras Coloridas	Erros de fase da sub-portadora; qualidade geral da imagem; amplitude do “burst”; ajustes de saturação e tonalidade no receptor
“Black Burst”	Relação Sinal/Ruído de Luminância
Multiburst	Resposta em Frequência
Campo completo (R, G ou B)	Relação Sinal/Ruído de crominância; ruído impulsivo; alinhamento e pureza de cor de cinescópios coloridos
Pulso e Barra	Atraso de Croma; ganho de croma; distorção de fase; resposta em baixas frequências
Rampa Modulada	Ganho diferencial; fase diferencial; conversão A/D
Escada de Luminância	Não-linearidade de luminância; intermodulação luma-croma
Escada de Croma	Não-linearidade de crominância; intermodulação croma-luma
“Ghost Cancelling Reference” (GCR®)	Sinal de referência (inserido no intervalo vertical) para equalização automática em receptores de TV (cancelador de fantasmas)

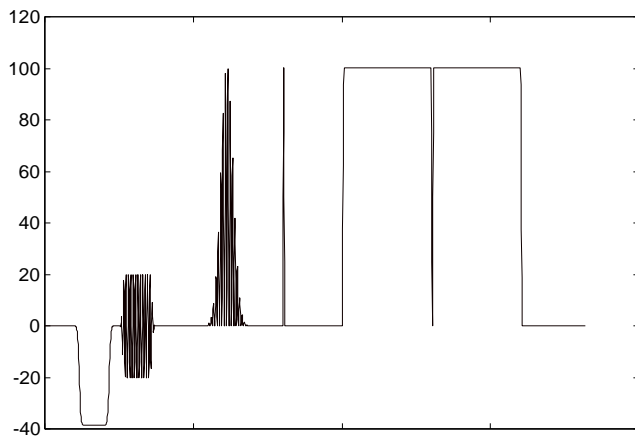
“Black Burst”



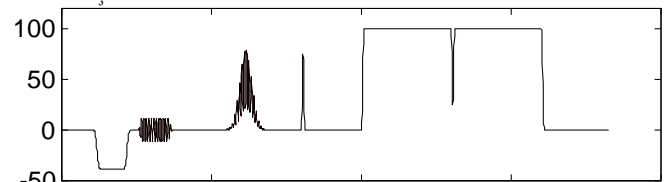
Sinal com presença de ruído aditivo:



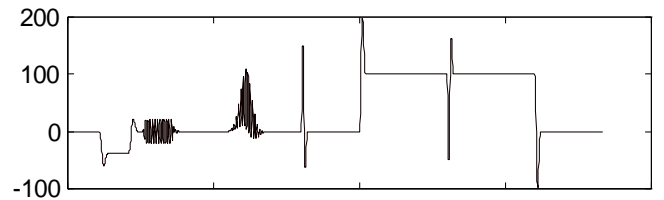
Pulso e Barra:



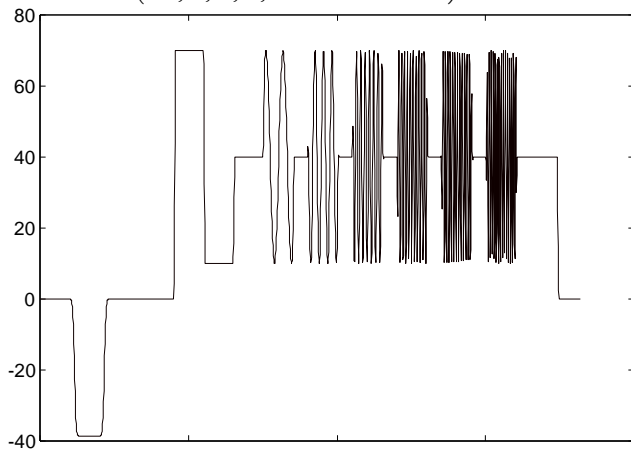
Atenuação do sinal de croma:



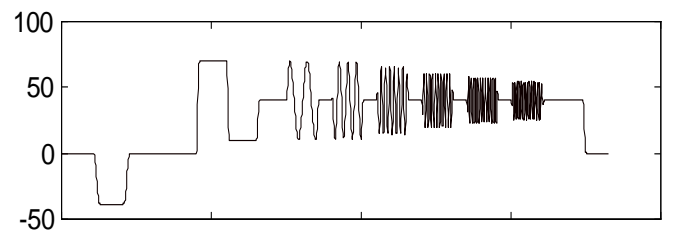
Atraso do sinal de croma:



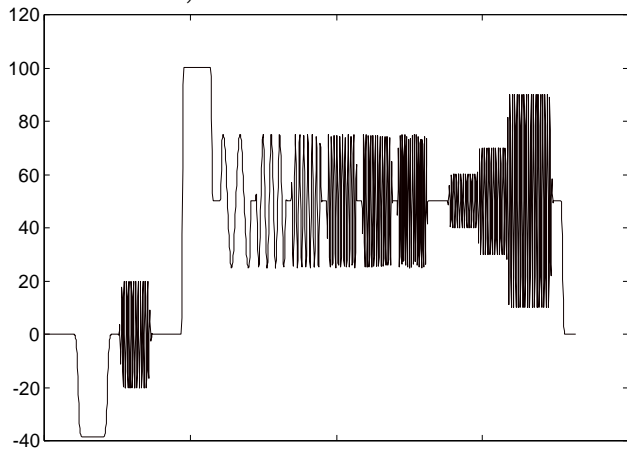
Multiburst (0.5, 1, 2, 3, 3.58 e 4.2 MHz):



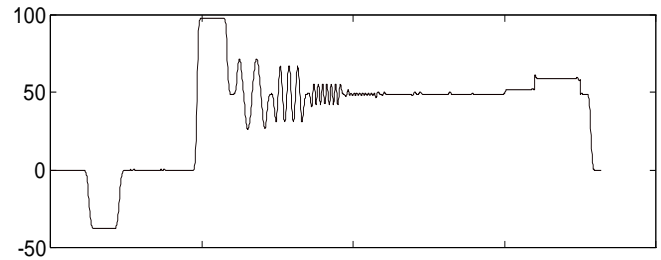
Efeito da limitação da resposta em frequência:



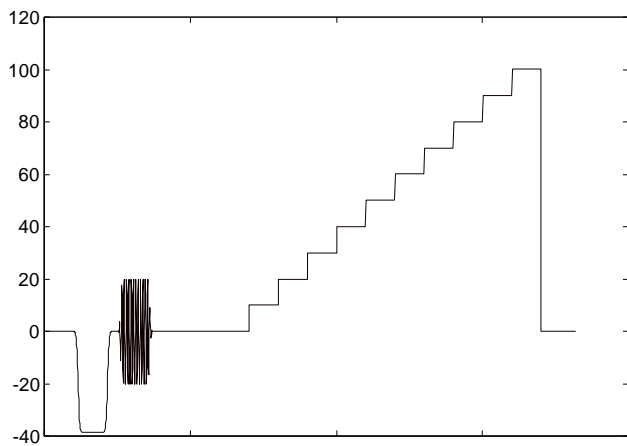
Combinado NTC7 (Multiburst + Escada de Crominância):



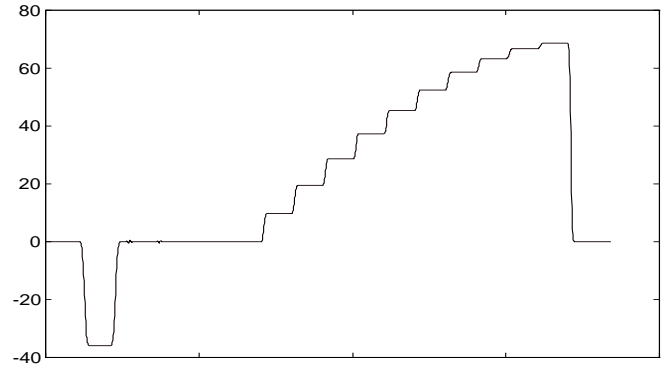
Efeito de intermodulação luma-croma (Filtro de rejeição de croma ativado):



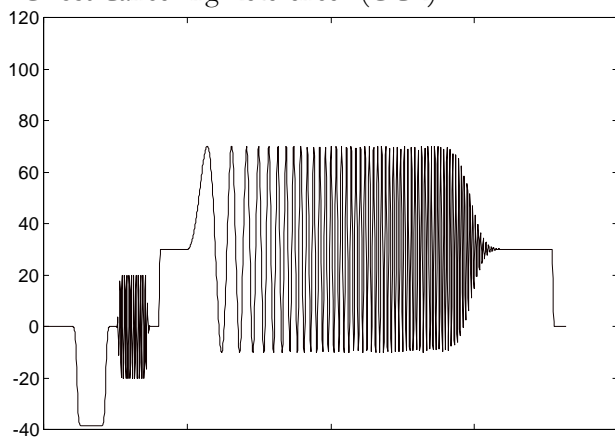
Escada de Luminância:



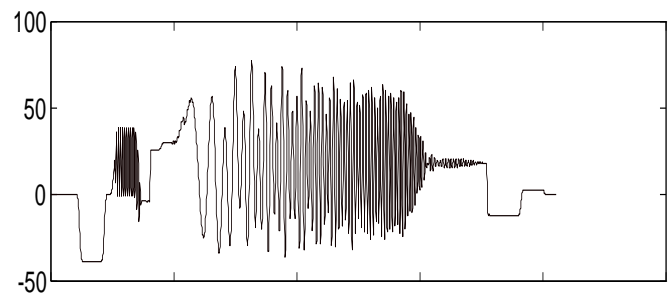
Efeito de não-linearidade (Filtro de rejeição de croma ativado):



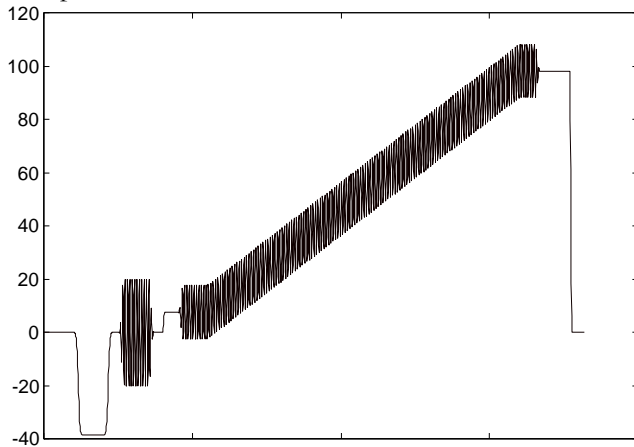
“Ghost Cancelling Reference” (GCR):



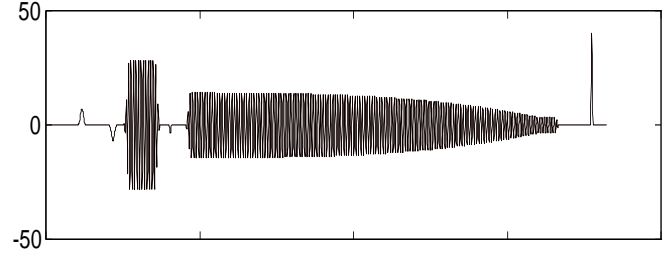
Efeito de multipercurso na recepção do GCR:



Rampa Modulada:



Efeito de não-linearidade (filtro de croma ativado):



11. Sinais de Teste para Televisão de Alta Definição

A maior parte dos sinais descritos no item anterior destina-se a diagnosticar problemas que podem ocorrer na codificação tricromática, e são específicos para a modulação NTSC ou PAL. Muitos desses problemas inexistem na TV de alta definição, graças à transmissão digital. Para avaliação da qualidade geral, particularmente dos dispositivos de visualização de imagem, um sinal bastante utilizado é o padrão de barras SMPTE RP219 / ARIB STD-B28. Além das barras coloridas, que permitem testar as amplitudes relativas das componentes R, G e B, este padrão possui uma rampa linear de luminância (*Y-Ramp*, fig. 11.1), destinada a testar os limites e a linearidade dos conversores A/D e D/A usados na digitalização do sinal.

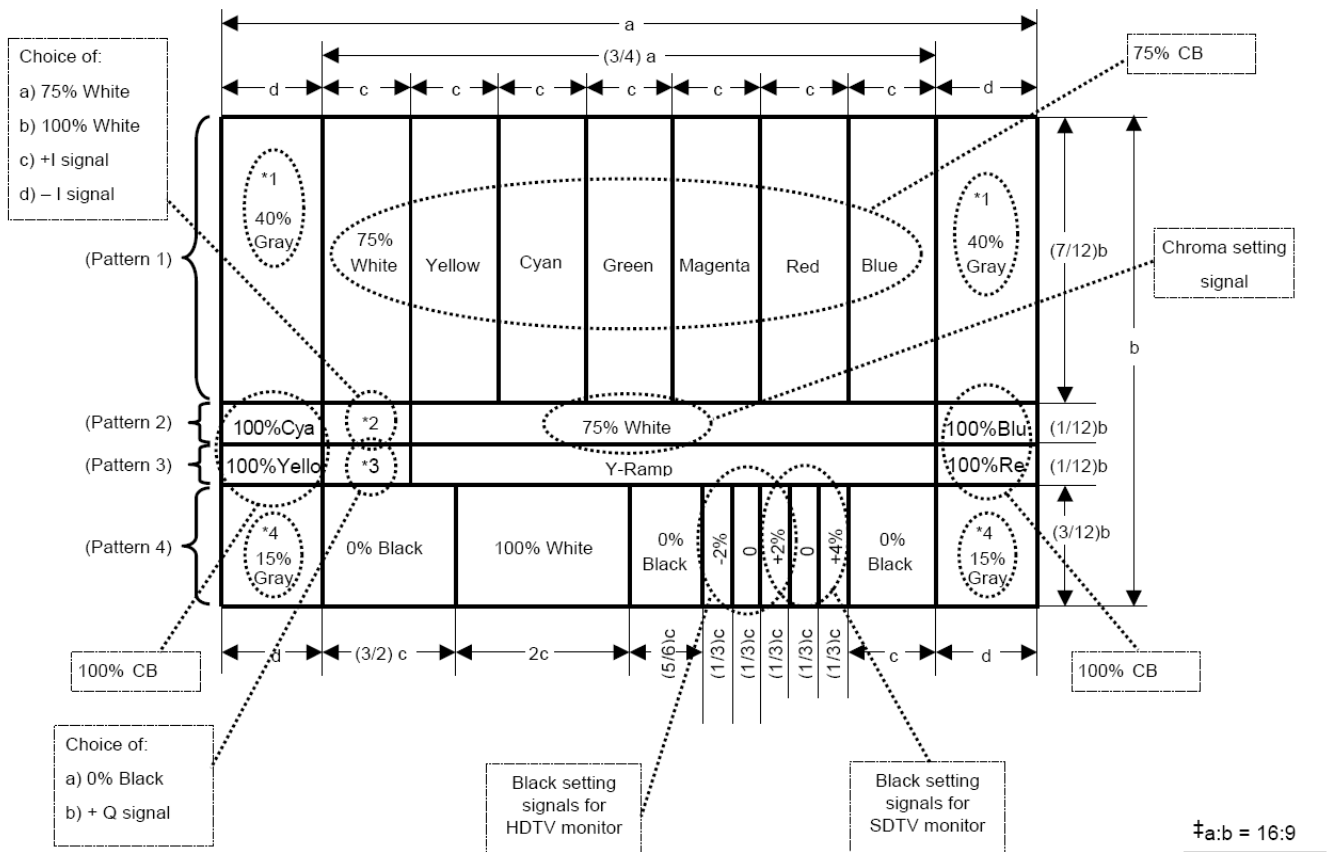


Fig. 11:1 – Padrão de Barras SMPTE RP219

12. Referências:

- Colour Television* - S. V. Novakovsy - MIR, 1975 (fig. 3.3, 3.6)
- Digital Television Fundamentals* - M. Robin, M. Poulin - McGraw-Hill, 1997
- DTV Handbook* - Jerry Whitaker - McGraw-Hill, 2001
- Eye and Brain: The Psychology of Seeing* - R. L. Gregory - Princeton University Press, 1997
- International Telecommunications Union: Rec. ITU-R BT.709-6* - 2015
- International Telecommunications Union: Rec. ITU-R BT.2020-2* - 2015
- MPEG Video Compression Standard* - John Mitchell et al. - Chapman & Hall, 1996
- NAB Engineering Handbook* - National Association of Broadcasters, 1999 (fig. 3.6)
- Standard Handbook for Electrical Engineers* - Donald G. Fink, H. Wayne Beaty, ed. - Mc Graw-Hill, 1993
- Televisão a Cores* - A. Eisele - Ao Livro Técnico, 1973
- Television Engineering Handbook* - K. Blair Benson, ed. - Mc Graw-Hill, 1985 (fig. 3.5, 4.1, 4.2)
- Television Products Catalog* - Tektronix, Inc. - 1998 (fig. 10.1, 10.2)
- Video Engineering* - Andrew F. Inglis, Arch C. Luther - Mc Graw-Hill, 1996
- Visual Intelligence* - Donald D. Hoffman - W. W. Norton, 1998

13. Tabela: Função de Luminância $F(\lambda)$ e Funções de Cromaticidade RGB e XYZ (CIE-1931)

λ (nm)	$\bar{r}(\lambda)$	$\bar{g}(\lambda)$	$\bar{b}(\lambda)$	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$ = $F(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$M_x(\lambda)$	$M_y(\lambda)$
380	0.0000	0.0000	0.0012	0.0014	0.00004	0.0065	0.174	0.004
390	0.0001	0.0000	0.0036	0.0042	0.00012	0.0201	0.174	0.004
400	0.0003	-0.0001	0.0121	0.0143	0.0004	0.0679	0.173	0.005
410	0.0008	-0.0004	0.0371	0.0435	0.0012	0.2074	0.173	0.005
420	0.0021	-0.0011	0.1154	0.1344	0.0040	0.6456	0.171	0.005
430	0.0022	-0.0012	0.2477	0.2839	0.0116	1.3856	0.169	0.007
440	-0.0026	0.0015	0.3123	0.3483	0.0230	1.7471	0.164	0.011
450	-0.0121	0.0068	0.3167	0.3362	0.0380	1.7721	0.157	0.018
460	-0.0261	0.0149	0.2982	0.2908	0.0600	1.6692	0.144	0.030
470	-0.0393	0.0254	0.2299	0.1954	0.0910	1.2876	0.124	0.058
480	-0.0494	0.0391	0.1449	0.0956	0.1390	0.8130	0.091	0.133
490	-0.0581	0.0569	0.0826	0.0320	0.2080	0.4652	0.045	0.295
500	-0.0717	0.0854	0.0478	0.0049	0.3230	0.2720	0.008	0.538
510	-0.0890	0.1286	0.0270	0.0093	0.5030	0.1582	0.014	0.750
520	-0.0926	0.1747	0.0122	0.0633	0.7100	0.0782	0.074	0.834
530	-0.0710	0.2032	0.0055	0.1655	0.8620	0.0422	0.155	0.806
540	-0.0315	0.2147	0.0015	0.2904	0.9540	0.0203	0.230	0.754
550	0.0228	0.2118	-0.0006	0.4344	0.9950	0.0087	0.302	0.692
560	0.0906	0.1970	-0.0013	0.5945	0.9950	0.0039	0.373	0.624
570	0.1677	0.1709	-0.0014	0.7621	0.9520	0.0021	0.444	0.555
580	0.2543	0.1861	-0.0011	0.9163	0.8700	0.0017	0.512	0.487
590	0.3093	0.0975	-0.0008	1.0263	0.7570	0.0011	0.575	0.424
600	0.3443	0.0625	-0.0005	1.0622	0.6310	0.0008	0.627	0.372
610	0.3397	0.0356	-0.0003	1.0026	0.5030	0.0003	0.666	0.334
620	0.2971	0.0183	-0.0002	0.8544	0.3810	0.0002	0.691	0.308
630	0.2268	0.0083	-0.0001	0.6424	0.2650	0.0000	0.708	0.292
640	0.1597	0.0033	0.0000	0.4479	0.1750	0.0000	0.719	0.281
650	0.1017	0.0012	0.0000	0.2835	0.1070	0.0000	0.726	0.274
660	0.0593	0.0004	0.0000	0.1649	0.0610	0.0000	0.730	0.270
670	0.0315	0.0001	0.0000	0.0874	0.0320	0.0000	0.732	0.268
680	0.0169	0.0000	0.0000	0.0468	0.0170	0.0000	0.734	0.266
690	0.0082	0.0000	0.0000	0.0227	0.0082	0.0000	0.735	0.265
700	0.0041	0.0000	0.0000	0.0114	0.0041	0.0000	0.735	0.265
710	0.0021	0.0000	0.0000	0.0058	0.0021	0.0000	0.735	0.266
720	0.0011	0.0000	0.0000	0.0029	0.00105	0.0000	0.735	0.266
730	0.0005	0.0000	0.0000	0.0014	0.00052	0.0000	0.735	0.266
740	0.0003	0.0000	0.0000	0.0007	0.00025	0.0000	0.735	0.266
750	0.0001	0.0000	0.0000	0.0003	0.00012	0.0000	0.735	0.266
760	0.0001	0.0000	0.0000	0.0002	0.00006	0.0000	0.735	0.266
770	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.735	0.266
780	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.735	0.266

$M_x(\lambda), M_y(\lambda)$ = coordenadas (x, y) dos estímulos monocromáticos de comprimento de onda λ