

Colorimetria e TV a Cores

PTC3547

Codificação e Transmissão Multimídia

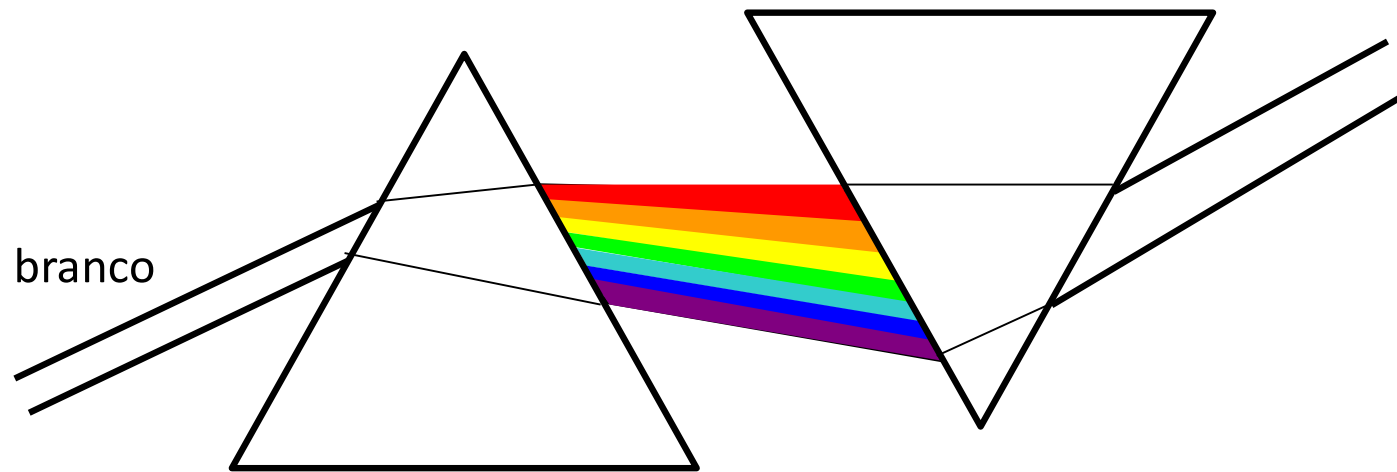
Guido Stolfi – EPUSP – 03/2025



- Oponentes cromáticas
- Modelo da Percepção Cromática
- Processos de Colorimetria
- Funções de Cromaticidade
- Coordenadas $r-g$ e $x-y$
- Exemplos de Cálculos Colorimétricos
- Transmissão de TV a Cores
- Codificadores NTSC, PAL-M
- Outros Codificadores Analógicos
- Colorimetria para HDTV e UHDV
- Equipamentos de Teste para sinais de Vídeo

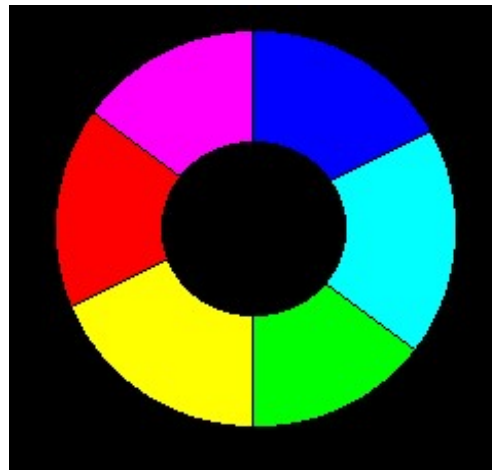
Experimento de Newton

LCS
EPUSP

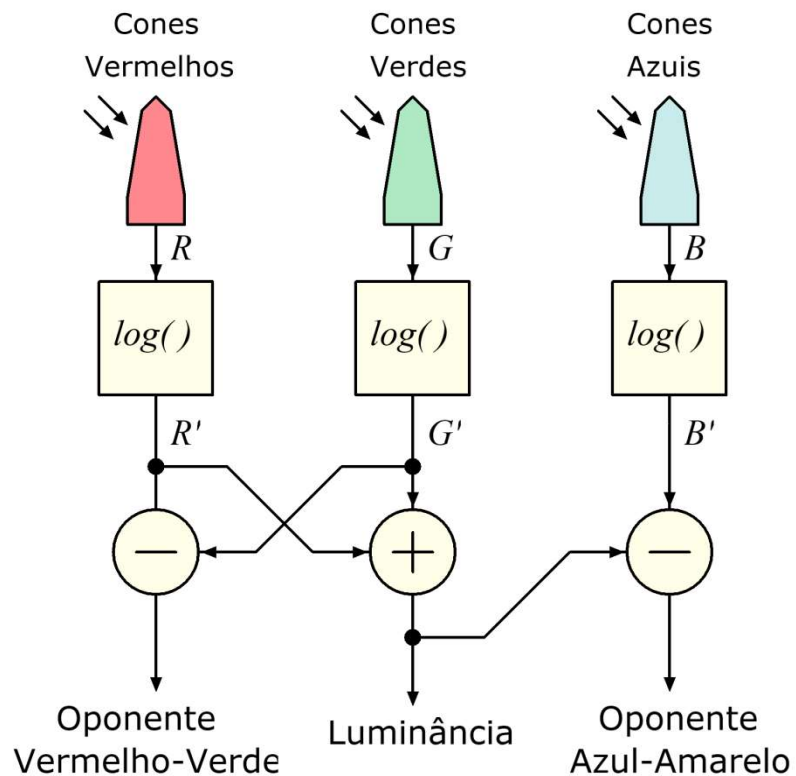


Cores Opostas

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



Modelo de Oponentes para Percepção Visual

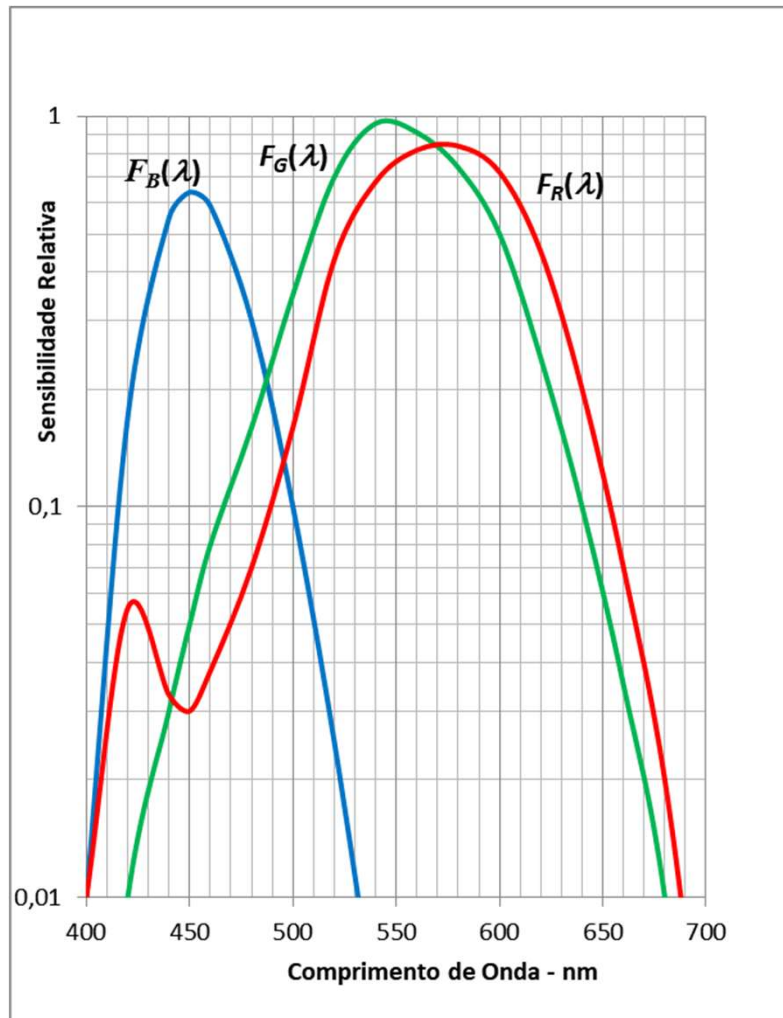


← Tri-estímulos (R, G, B)

← Percepção (R', G', B')

← Componentes (Y', U', V')

Sensibilidade Espectral da Visão



Valores Tri-estímulos (R, G, B):

$$R = \int P(\lambda) \cdot F_R(\lambda) d\lambda$$

$$G = \int P(\lambda) \cdot F_G(\lambda) d\lambda$$

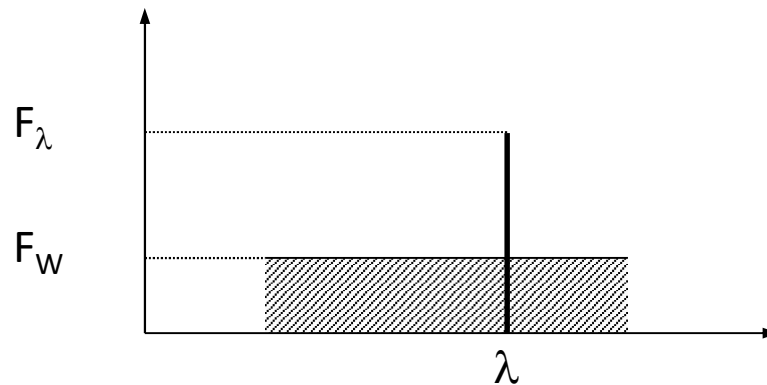
$$B = \int P(\lambda) \cdot F_B(\lambda) d\lambda$$

Duas distribuições espectrais diferentes podem causar a mesma percepção de cor, desde que os estímulos R, G e B sejam iguais.

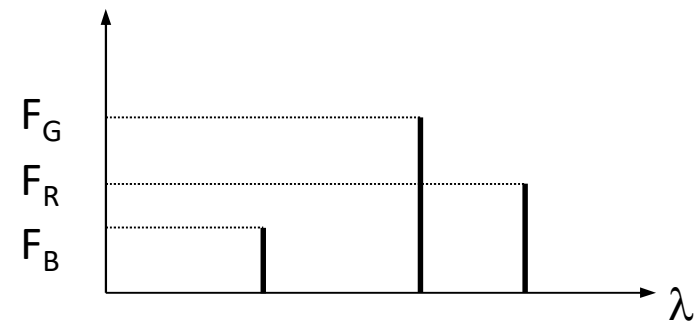
É o fenômeno que viabiliza a reprodução cromática, sem a necessidade de recriar o espectro original das cores.

Colorimetria: medida objetiva da cor

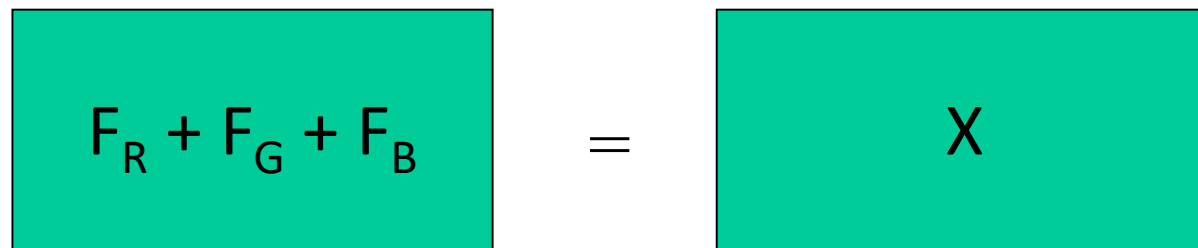
Meta: Reproduzir os estímulos visuais R, G e B de forma controlada

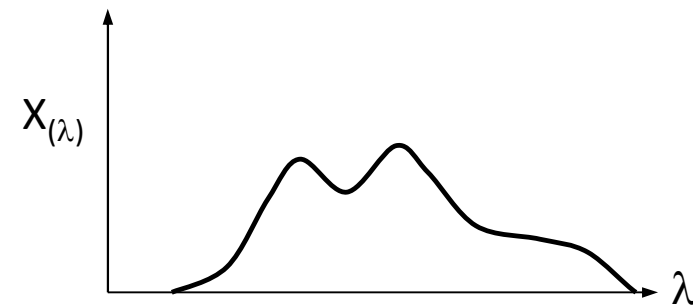
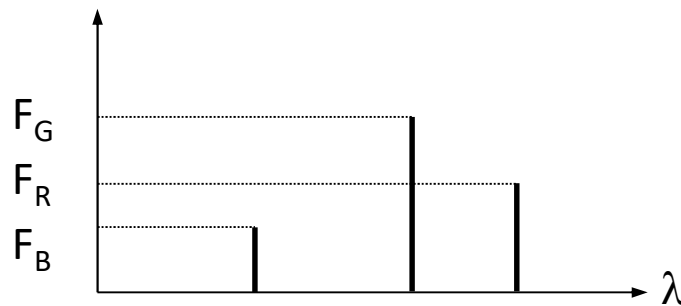


(a)



(b)


$$F_R + F_G + F_B = X$$



Metamerismo: Estímulos R, G, B iguais nos dois casos

Colorímetro Tri-Estímulos

LCS
EPUSP



1- Dados 3 estímulos primários convenientes, qualquer cor pode ser reproduzida por mistura aditiva ponderada dos estímulos, de uma única forma;

$$C_n = a P_1 + b P_2 + c P_3 \rightarrow \text{Unicidade da representação}$$

(a, b, c podem ser positivos ou negativos)

Estímulos "convenientes": conjunto $\{P_1, P_2, P_3\}$ linearmente independente, onde nenhum estímulo pode ser reproduzido pela combinação dos outros dois.

Hermann Günther Grassmann, 1853

2- A cromaticidade de uma cor permanece inalterada se as quantidades dos primários que a reproduzem forem multiplicados por um mesmo fator;

$$kC_n = ka P_1 + kb P_2 + kc P_3 \rightarrow \text{Linearidade multiplicativa}$$

Tonalidade e saturação permanecem constantes, só mudando o brilho.

Hermann Günther Grassmann, 1853

3- Uma cor que resulta da soma de outras duas, será reprodutível pela soma das respectivas quantidades correspondentes dos 3 estímulos.

$$\text{Se } C_n = a P_1 + b P_2 + c P_3; \quad C_m = d P_1 + e P_2 + f P_3$$

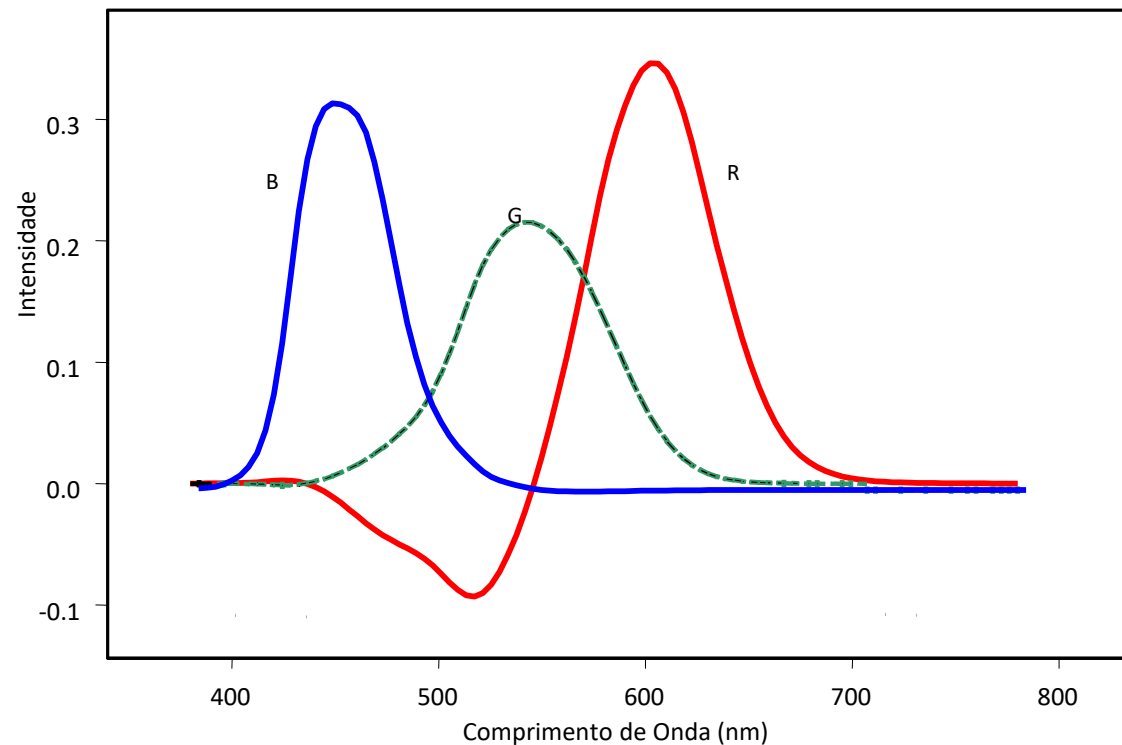
$$\text{Então } C_n + C_m = (a + d) P_1 + (b + e) P_2 + (c + f) P_3$$

→ Superposição aditiva

Hermann Günther Grassmann, 1853

Funções de Cromaticidade para Observador Padrão

Quantidades de primárias **R**, **G** e **B** (Triestímulos) necessárias para reproduzir um estímulo monocromático; λ entre 380 e 800 nm



Primários em 700nm (**R**), 546.1 nm (**G**) e 435.8 nm (**B**)

Coordenadas Colorimétricas

Tri-estímulos (R, G, B):

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

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

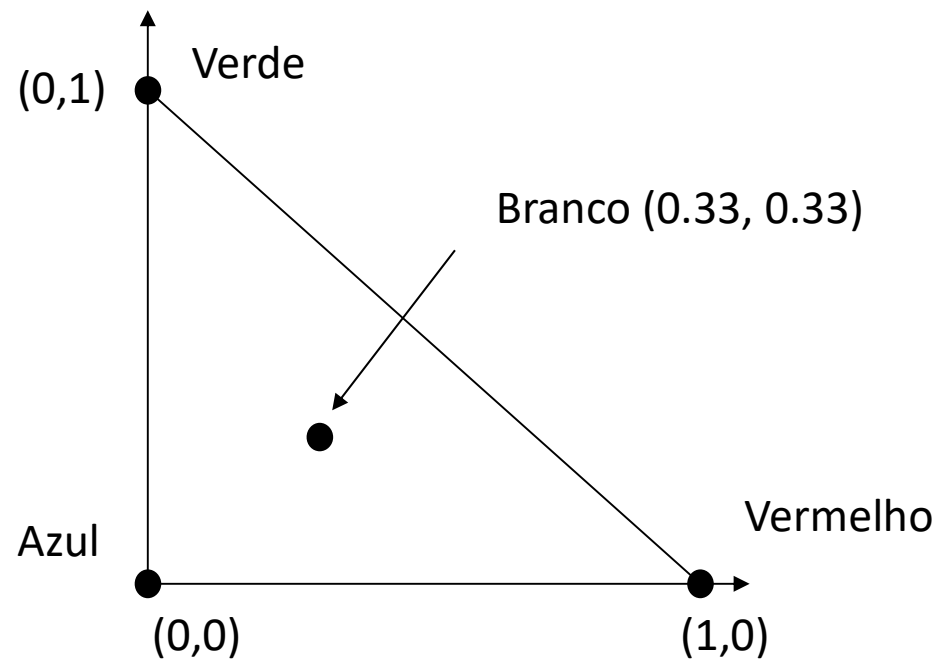
$$B = \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda$$

Coordenadas de Cromaticidade
(r, g, b):

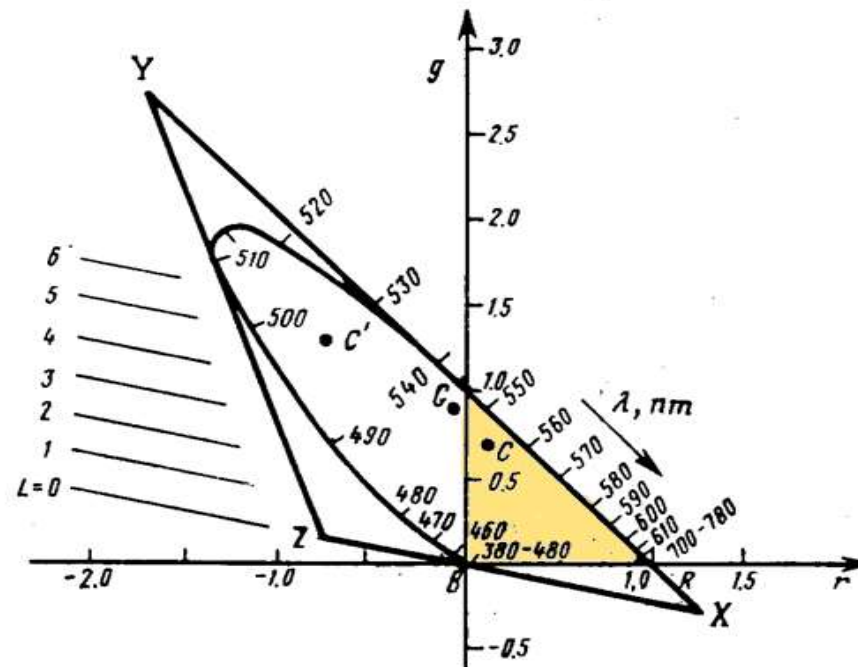
$$r = \frac{R}{R + G + B}$$

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

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



Cores Espectrais nas Coordenadas r-g



$$X = 0.490R + 0.310G + 0.200B$$

$$Y = 0.177R + 0.813G + 0.011B$$

$$Z = 0.000R + 0.010G + 0.990B$$

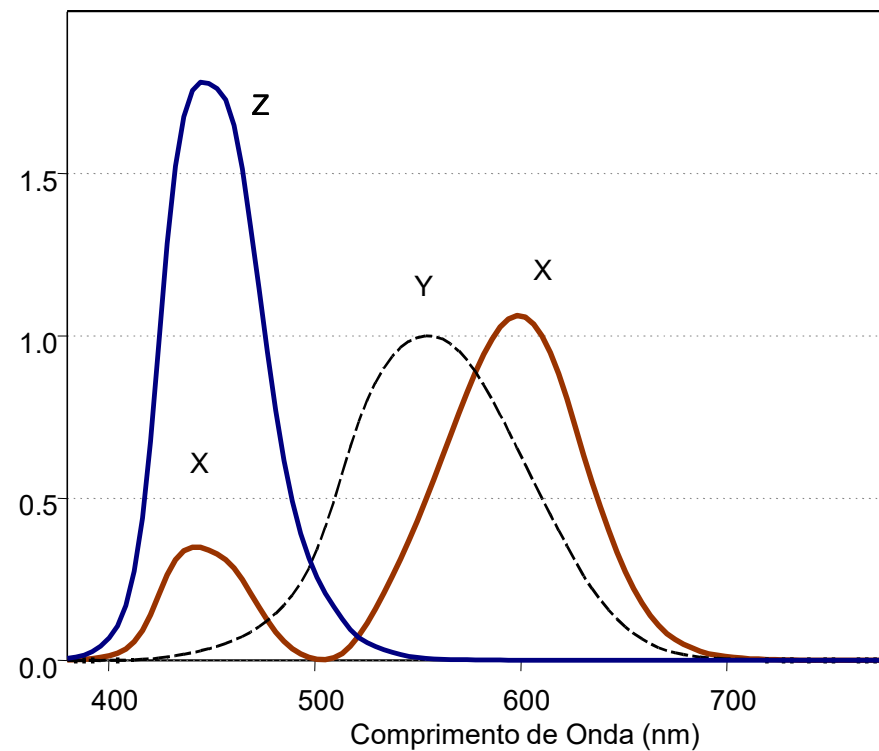
$$R = 2.365X - 0.897Y - 0.468Z$$

$$G = -0.515X + 1.426Y + 0.089Z$$

$$B = 0.005X - 0.014Y + 1.009Z$$

Funções de Cromaticidade x,y,z

Quantidades de **X**, **Y** e **Z** necessárias para reproduzir um estímulo
Monocromático, λ entre 380 e 700 nm

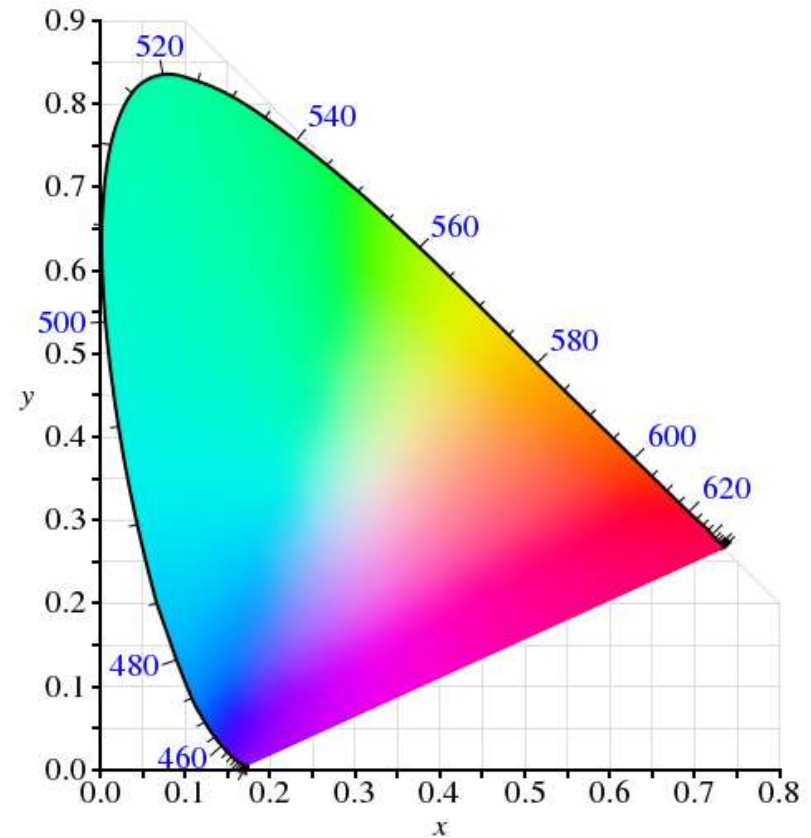
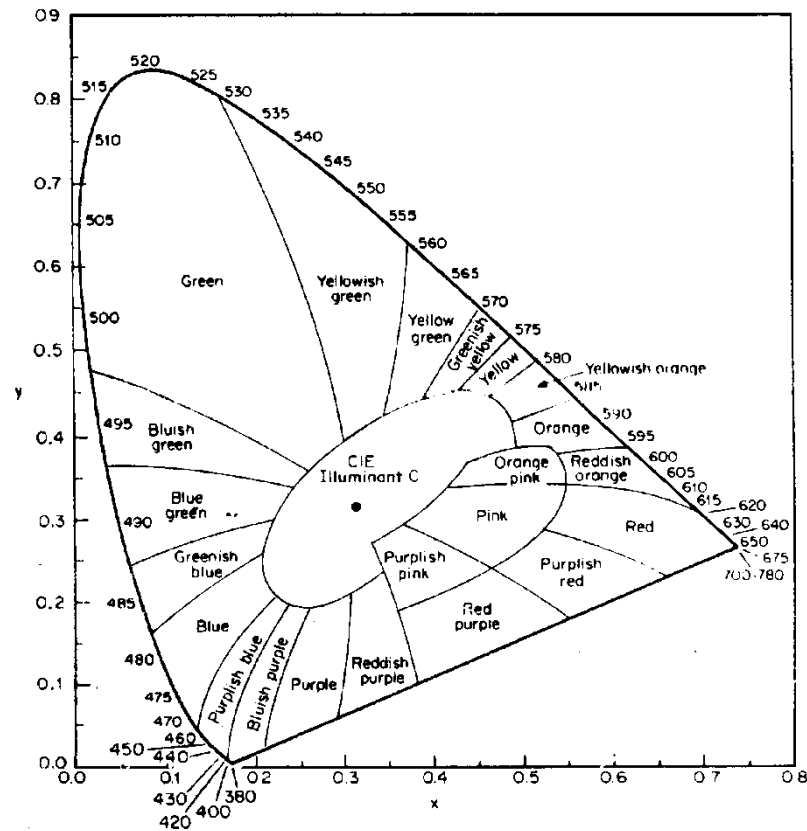


$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

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

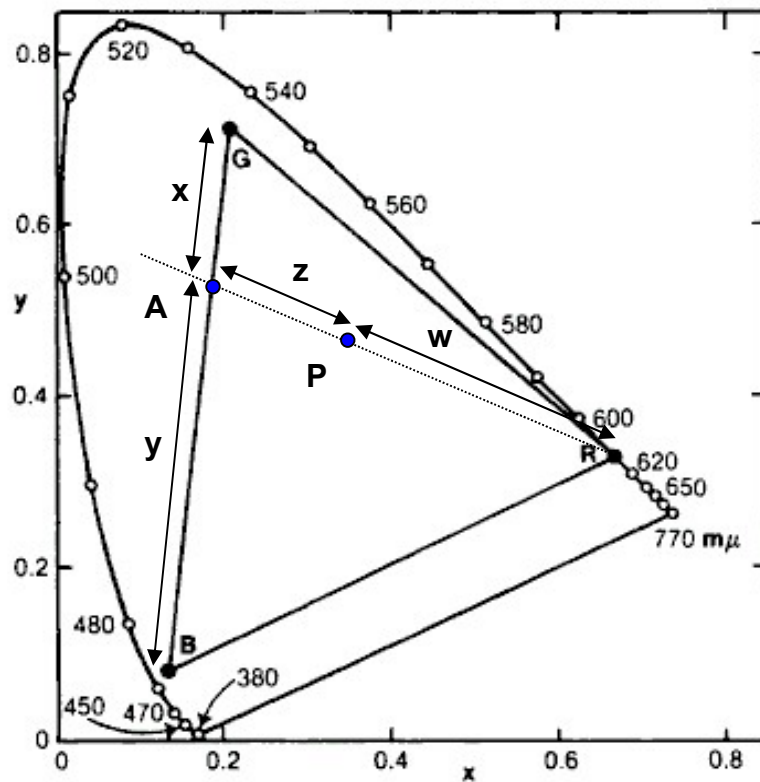
Diagrama de Cromaticidade CIE

LCS
EPUSP



CIE: Comission Internationale de l' Eclairage

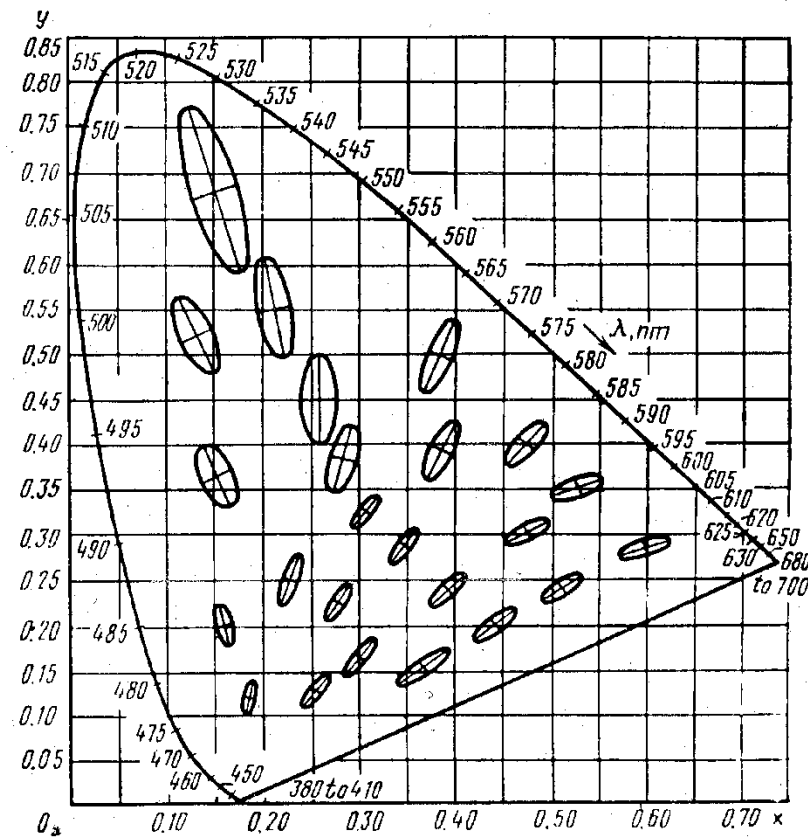
Linearidade na Superposição de Cores



$$A = (yG + xB)/(x+y)$$

$$P = (wA + zR)/(w+z)$$

Sensibilidade da Visão para Diferenças de Cromaticidade



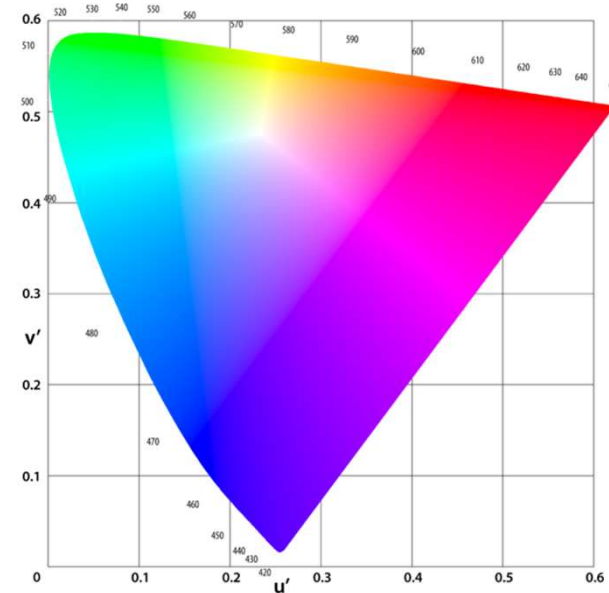
Representação 'Uniforme': CIE L*u*v*

LCS
EPUSP

$$L^* = \begin{cases} 903,3 \frac{Y}{Y_n} ; & \frac{Y}{Y_n} \leq 0,008856 \\ 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 ; & 0,008856 \leq \frac{Y}{Y_n} \end{cases}$$

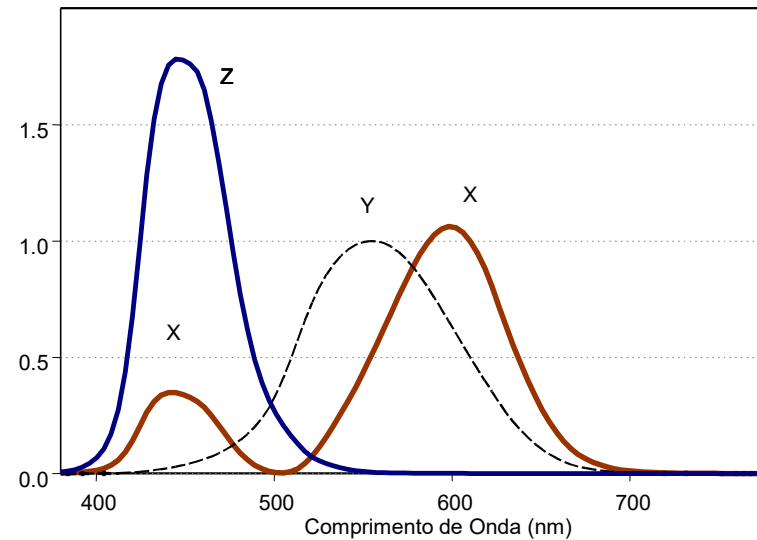
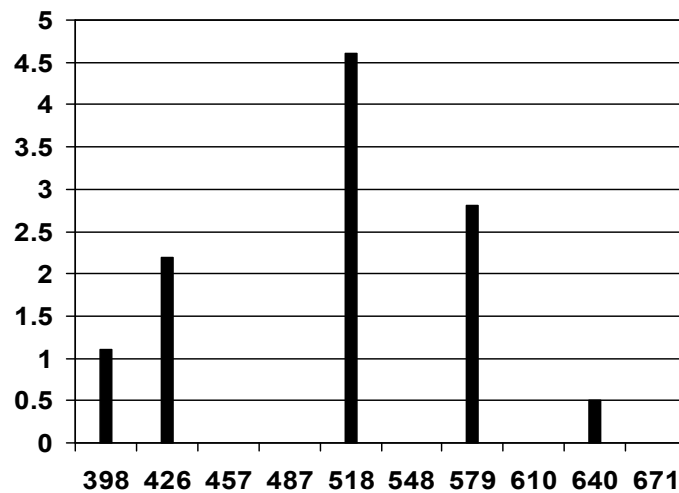
$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} ;$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}$$



Exemplos

Exemplo: Colorimetria de uma Lâmpada de Descarga a Gás



$$X = \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda = 1.1 \times 0.014 + 2.2 \times 0.284 + 4.6 \times 0.063 + 2.8 \times 0.916 + 0.5 \times 0.448 = 3.72$$

$$Y = \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda = 1.1 \times 0.0004 + 2.2 \times 0.012 + 4.6 \times 0.71 + 2.8 \times 0.87 + 0.5 \times 0.175 = 5.82$$

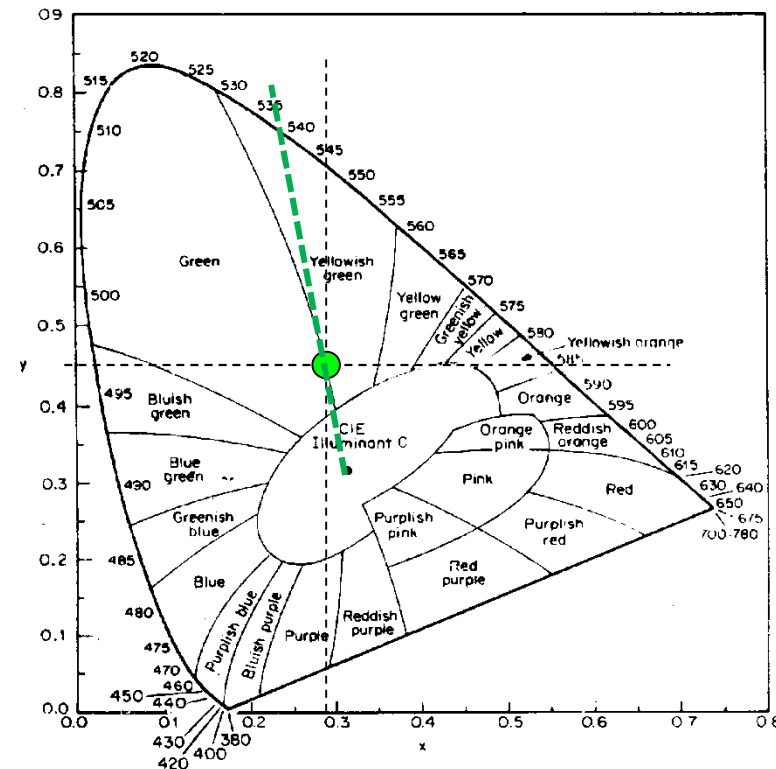
$$Z = \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda = 1.1 \times 0.068 + 2.2 \times 1.39 + 4.6 \times 0.078 + 2.8 \times 0.002 + 0.5 \times 0.0 = 3.50$$

Exemplo: Colorimetria de uma Lâmpada de Descarga a Gás

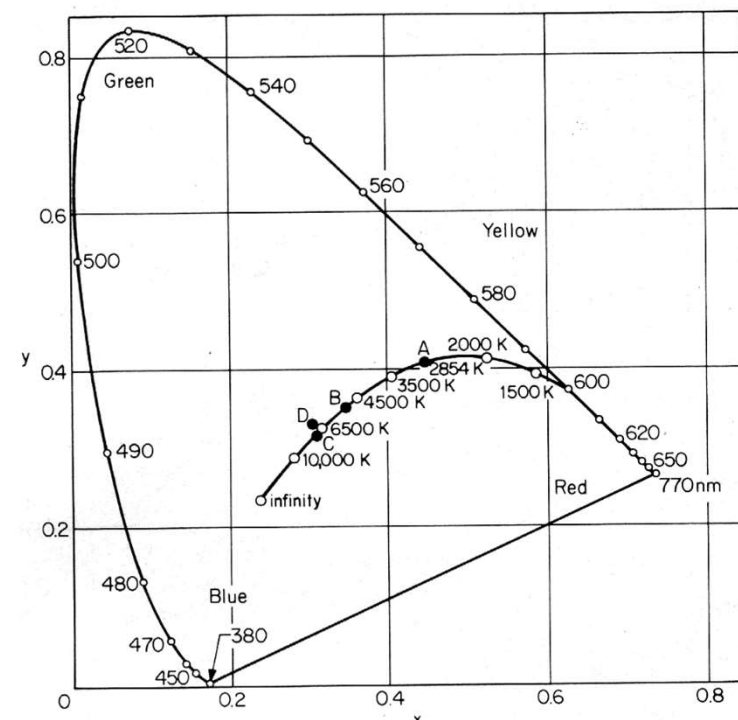
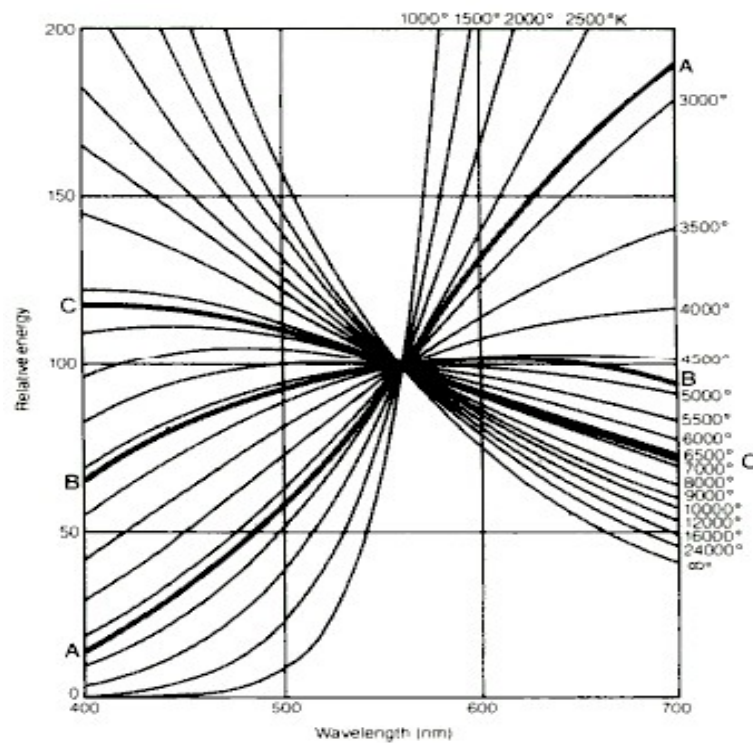
$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{3.72}{13.04} = 0.285$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{5.82}{13.04} = 0.446$$

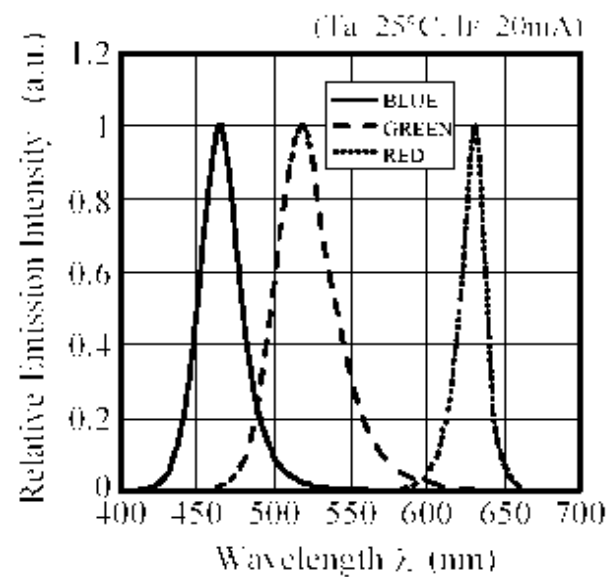
Comprimento de onda
dominante: ~538 nm



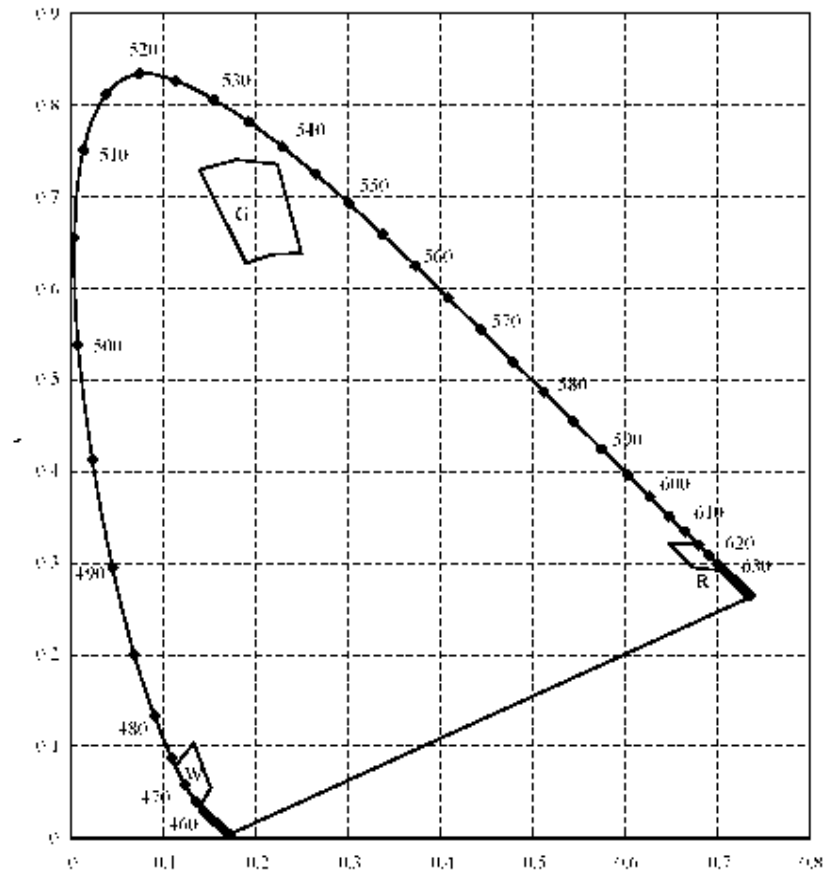
Exemplo: Colorimetria de um Corpo Negro Aquecido



Exemplo: Colorimetria de LED's RGB



LED Nichia NSCM315C



Exemplo: Balanceamento de LED's

Características dos LED's:

LED	Comprimento de Onda	Intensidade Luminosa a 20 mA
Vermelho	640 nm	80 mcd
Verde	570 nm	130 mcd
Azul	470 nm	25 mcd

Qual a corrente a ser aplicada em cada LED para obter luz branca?

Exemplo: Balanceamento de LED's

$$1 \text{ Candela} = \frac{1 \text{ Lumen}}{\text{esteroradiano}}$$

$$1 \text{ Lumen} = 1W \times 683 F(\lambda)$$

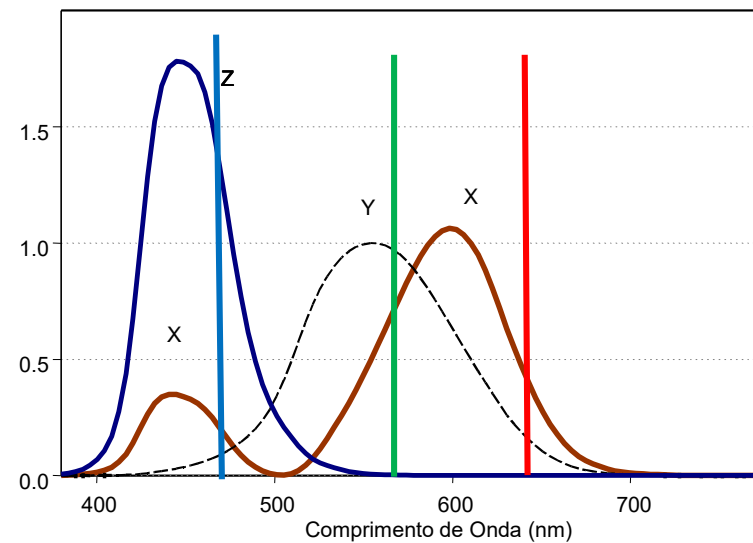
$$\text{Radiância} = \frac{\text{Watt}}{\text{esteroradiano}} = \frac{\text{Intensidade Luminosa}}{683 F(\lambda)}$$

Radiância dos LEDs (em $\mu\text{W}/\text{sr}$)

Led	λ (nm)	I (mcd)	$F(\lambda)$	Rad. ($\mu\text{W}/\text{sr}$)
R	640	80	0,175	669
G	570	130	0,952	200
B	470	25	0,091	402

Exemplo: Balanceamento de LED's

Componentes X, Y, Z :



Led	λ (nm)	Rad. ($\mu\text{W}/\text{sr}$)	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$	X	Y	Z
R	640	669	0,4479	0,1750	0,0000	299,6	117,1	0,0
G	570	200	0,7621	0,9520	0,0021	152,4	190,4	0,42
B	470	402	0,1954	0,0910	1,2876	78,6	36,6	517,6

Exemplo: Balanceamento de LED's

Para obtermos cor branca:

$$\begin{aligned} & r (299,6 X + 117,1 Y + 0 Z) + \\ & + g (152,4 X + 190,4 Y + 0,42 Z) + \\ & + b (78,6 X + 36,6 Y + 517,6 Z) = X + Y + Z \end{aligned}$$

Que implica:

$$\begin{aligned} 299,6 r + 152,4 g + 78,6 b &= 1 \\ 117,1 r + 190,4 g + 36,6 b &= 1 \\ 0,42 g + 517,6 b &= 1 \end{aligned}$$

Exemplo: Balanceamento de LED's

Resolvendo o sistema, temos:

$$r = 0,0051 \quad g = 0,00457 \quad b = 0,00193$$

Normalizando para $g = 1$ (maior valor dos 3):

$$r = 0,111 \quad g = 1,000 \quad b = 0,422$$

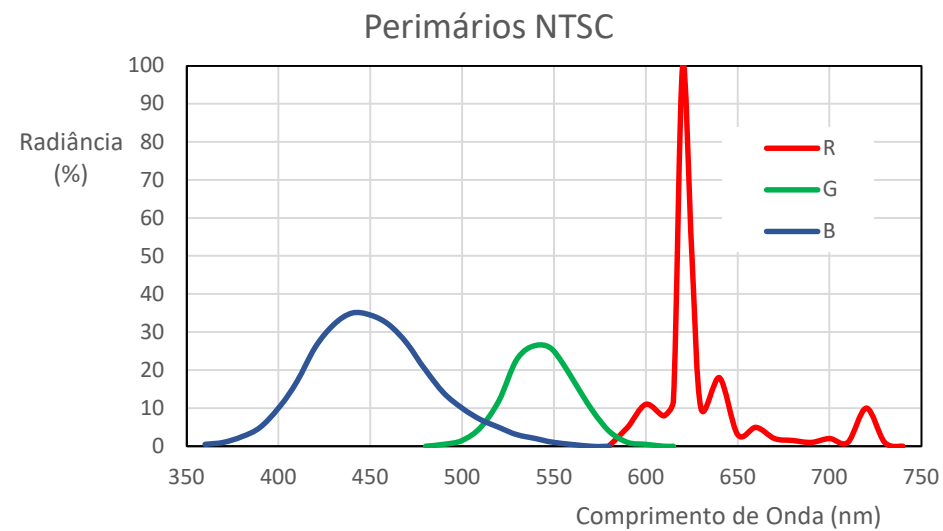
Normalizando para corrente máxima de 20 mA:

$$\mathbf{r = 2,22 \text{ mA} \quad g = 20 \text{ mA} \quad b = 8,44 \text{ mA}}$$

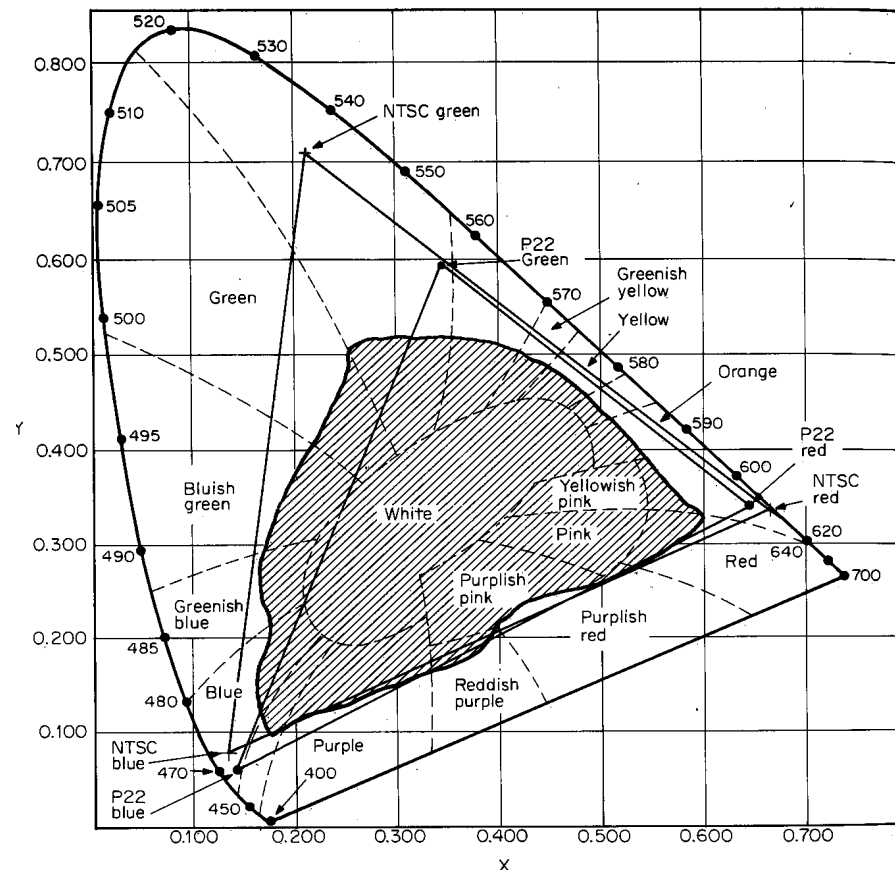
Intensidade luminosa de R + G + B = branco:

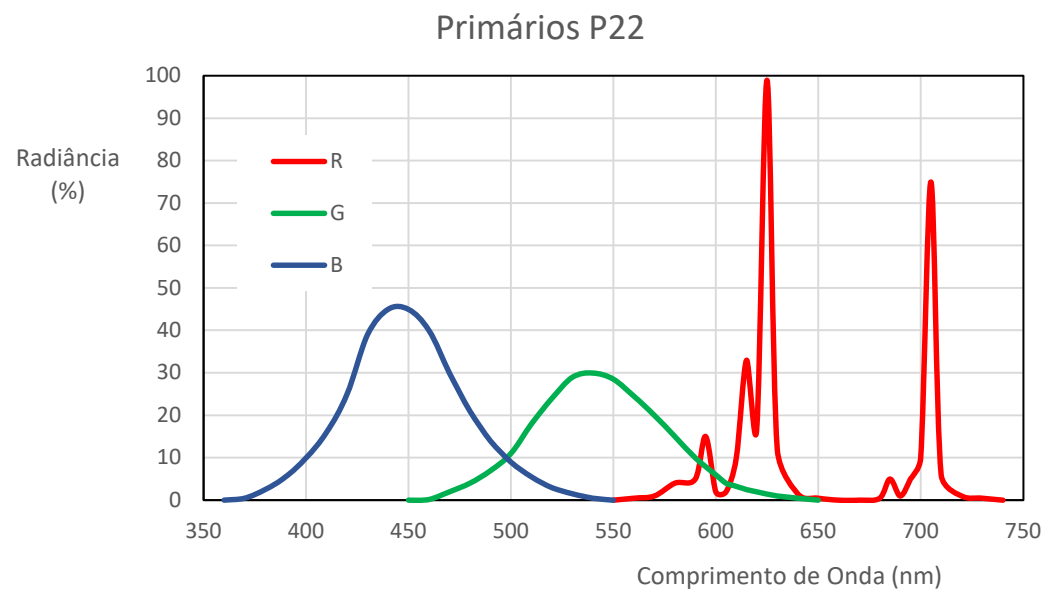
$$0,111 \times 80 + 1 \times 130 + 0,422 \times 25 = 150 \text{ mcd}$$

Primários de um Cinescópio (NTSC)

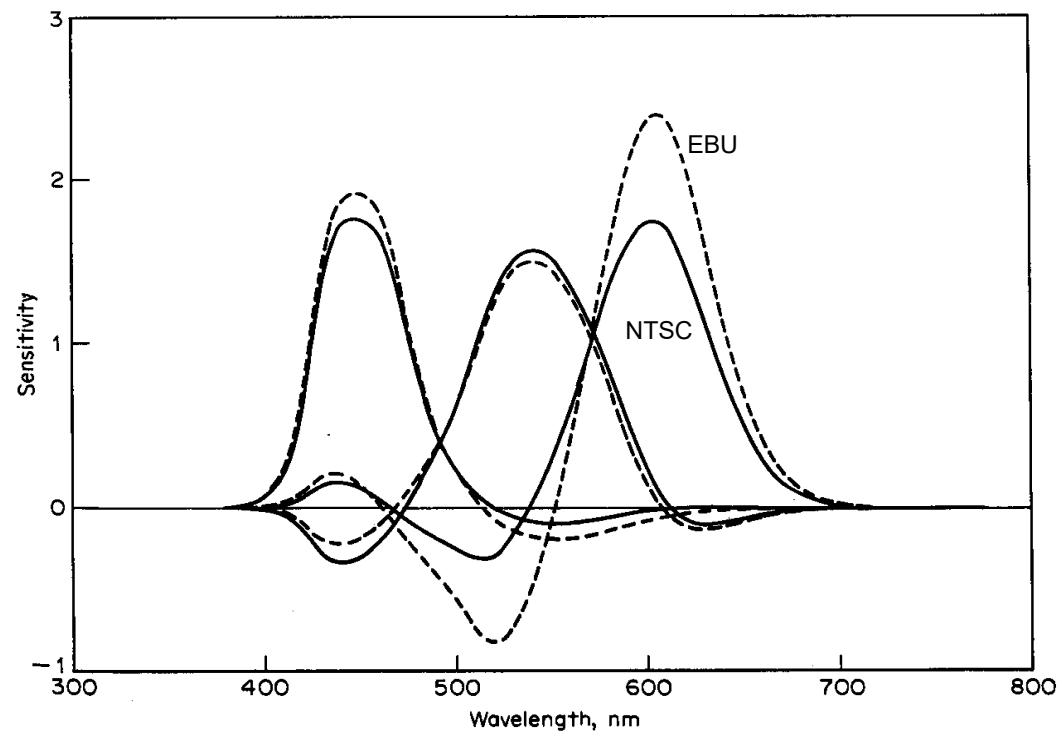


Coordenadas de Cromaticidade dos Primários (NTSC e P22)





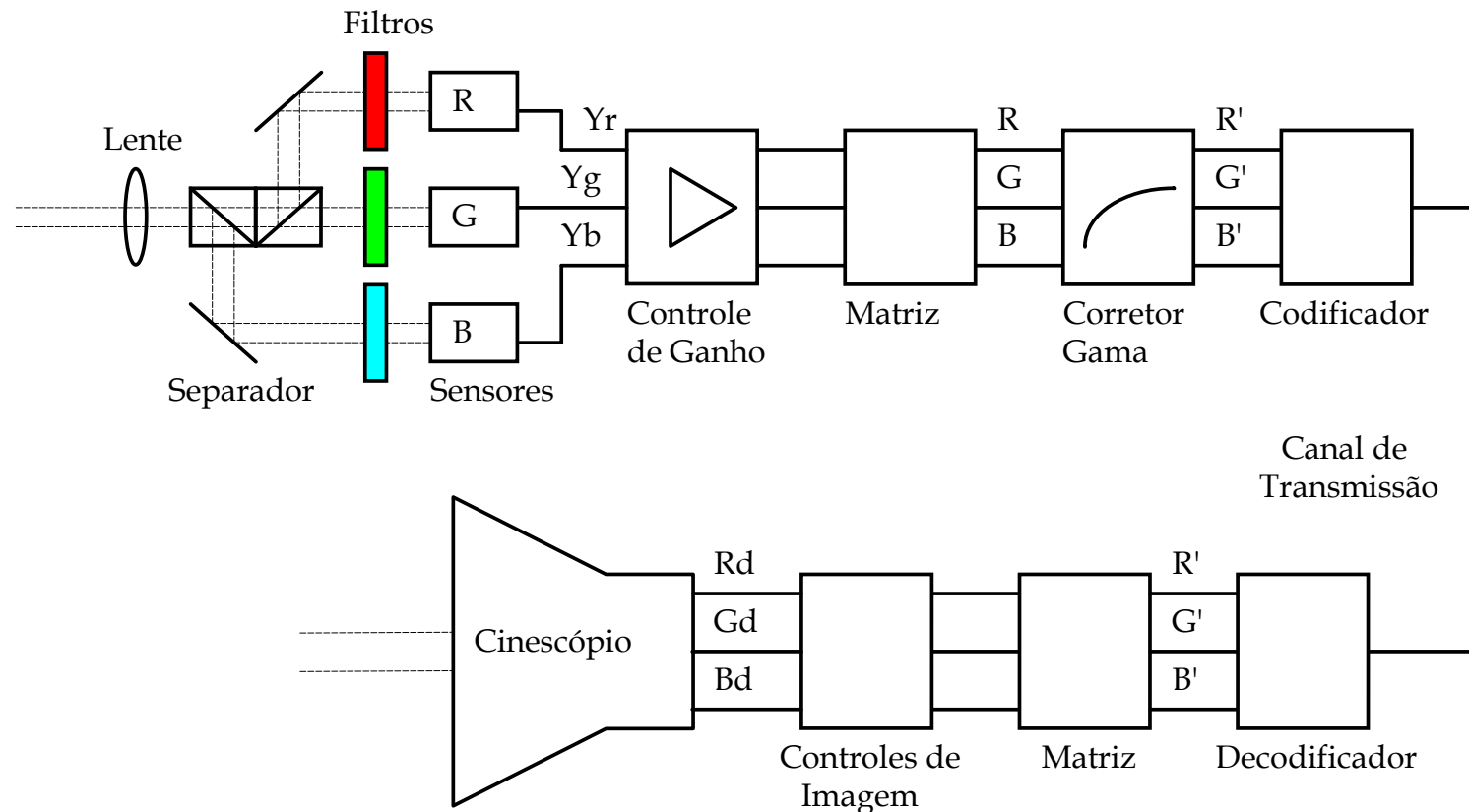
Funções de Cromaticidade Correspondentes aos Primários (NTSC e EBU)



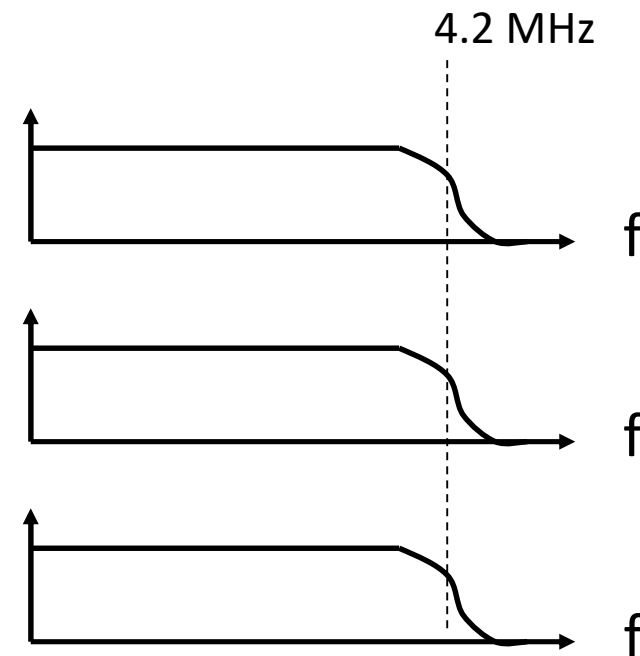
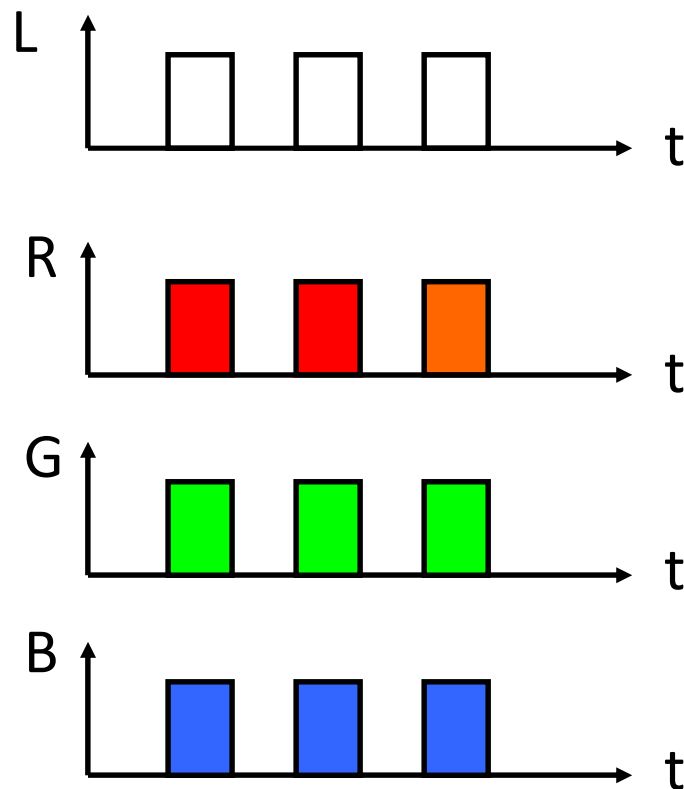
Transmissão de TV a Cores

- Fidelidade Física (espectral)
- Fidelidade de Valores Tri-estímulos (R, G, B)
- Fidelidade Colorimétrica (x, y)
- Reprodução Correspondente (mesma iluminação)
- Fidelidade Subjetiva (ao gosto do usuário)

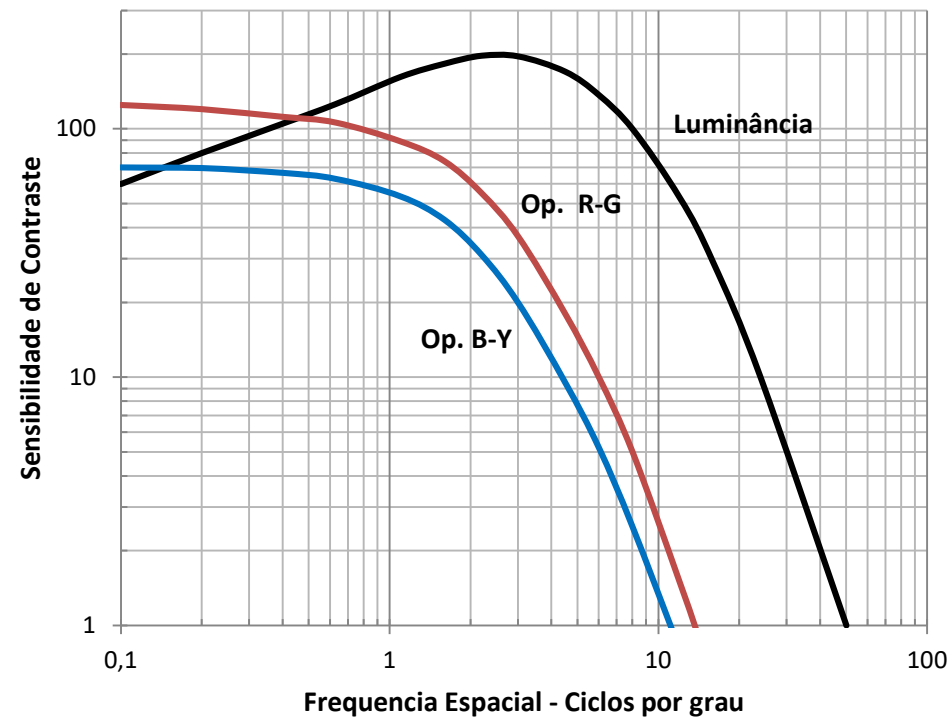
Diagrama de um Sistema de TV a Cores



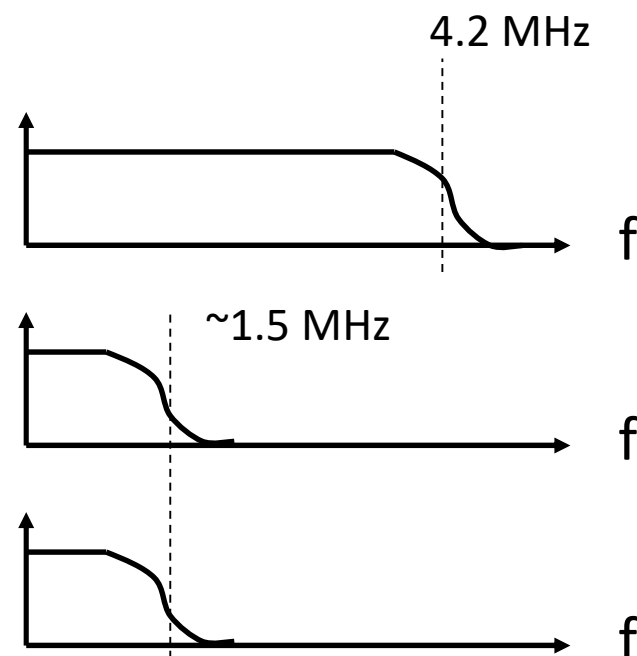
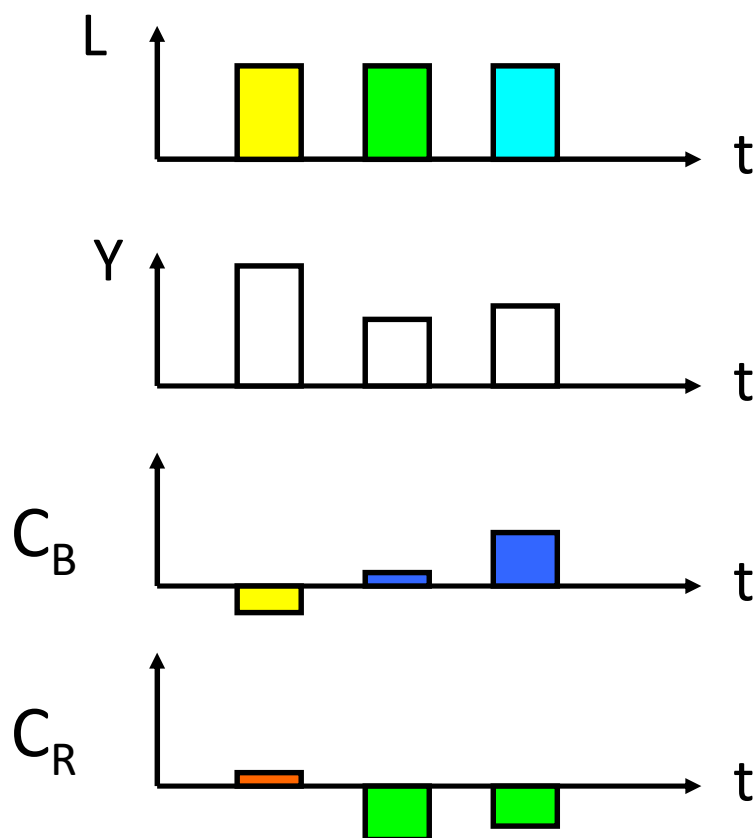
Banda Passante Necessária para Sistema RGB



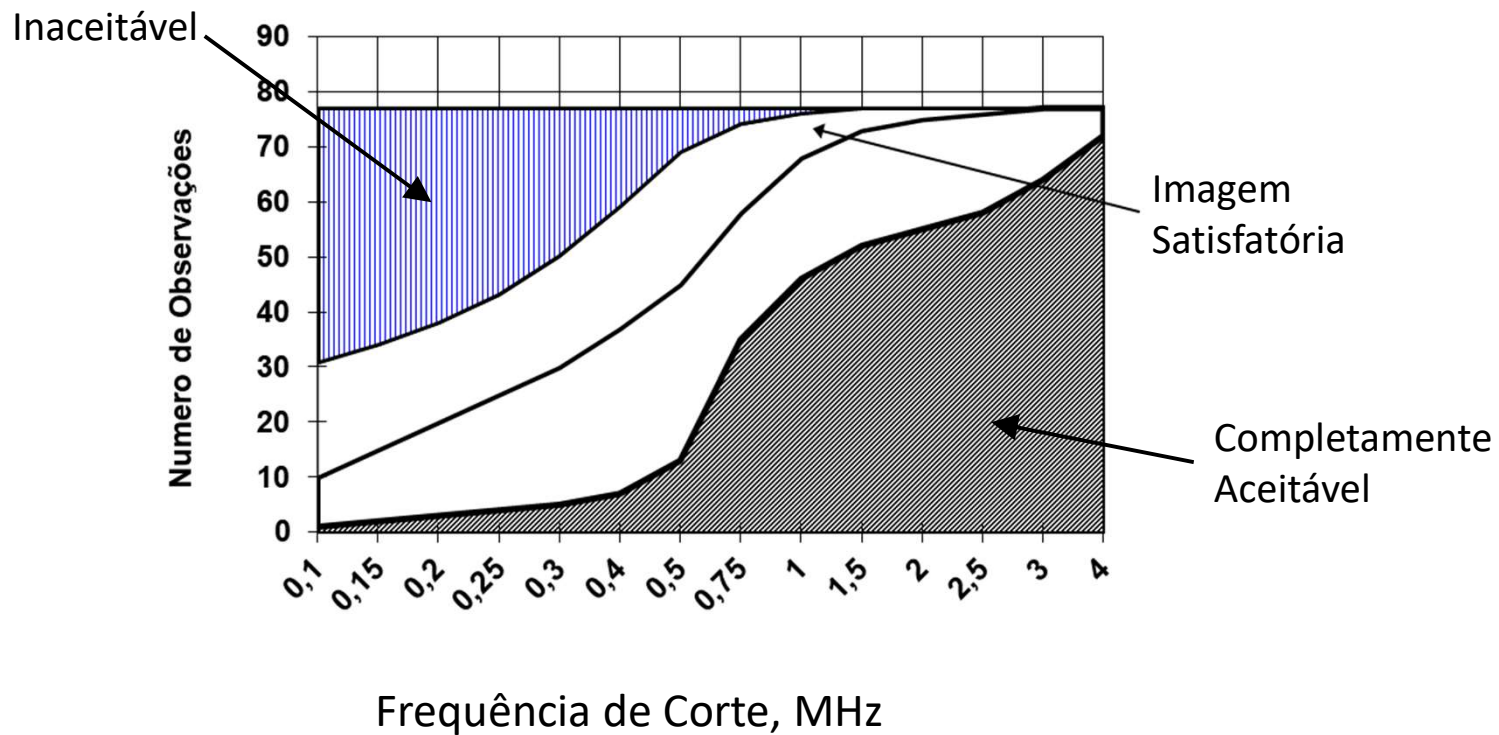
Resposta em Frequência Espacial da Visão



Banda Passante para Luminância e Oponentes Cromáticas



Testes Subjetivos de requisitos de Banda Passante



$$Y' = 0.299 R' + 0.587 G' + 0.114 B' \quad (4.2 \text{ MHz})$$

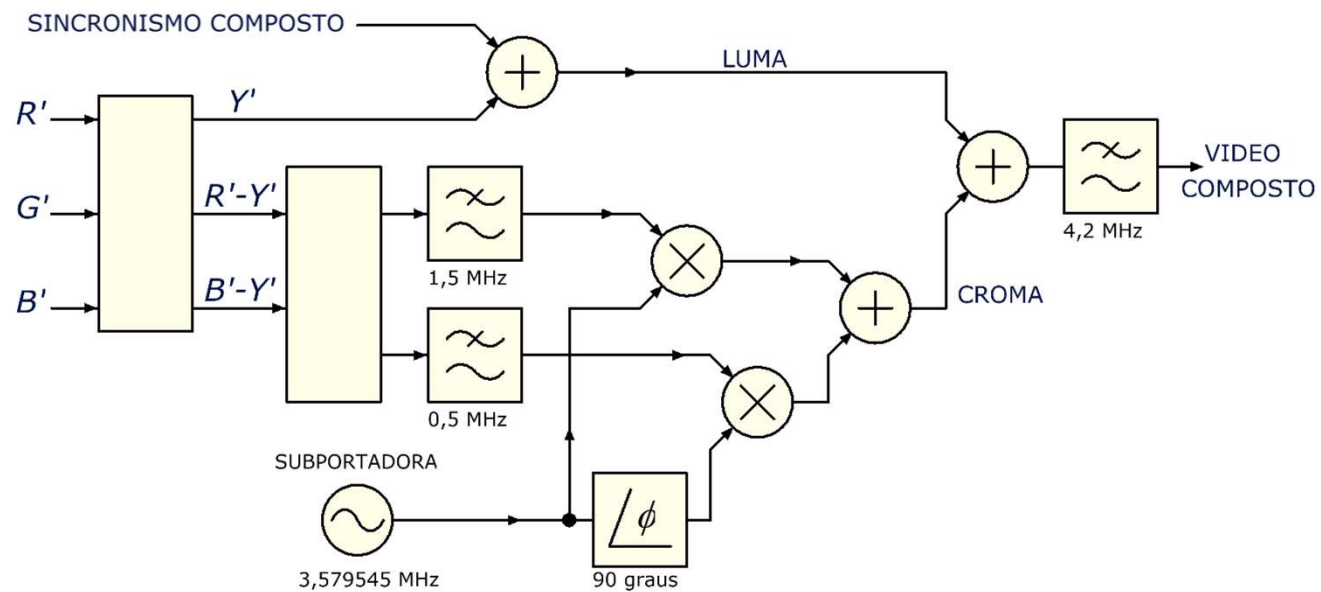
$$(R' - Y') = 0.701 R' - 0.587 G' - 0.114 B'$$

$$(B' - Y') = -0.299 R' - 0.587 G' + 0.886 B'$$

$$\begin{aligned} I' &= 0.74 (R' - Y') - 0.27 (B' - Y') = \\ &= 0.60 R' - 0.28 G' - 0.32 B' \quad (1.5 \text{ MHz}) \end{aligned}$$

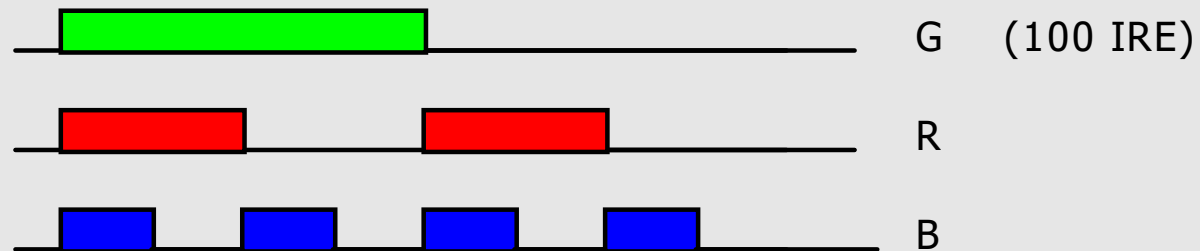
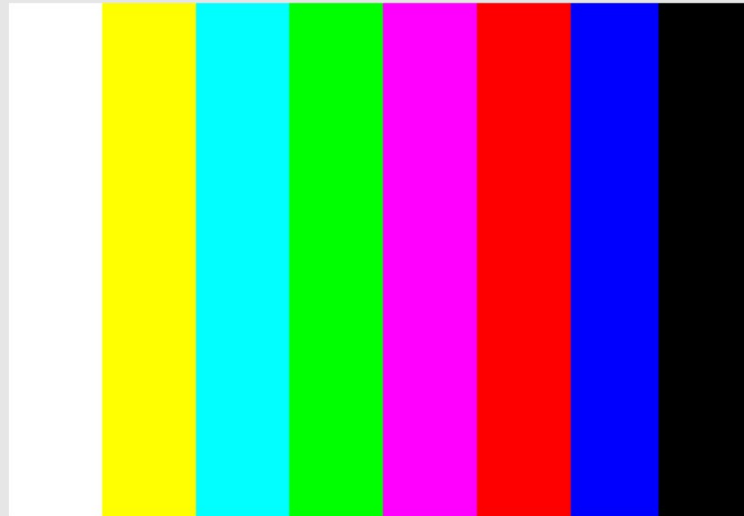
$$\begin{aligned} Q' &= 0.48 (R' - Y') + 0.41 (B' - Y') = \\ &= 0.21 R' - 0.52 G' + 0.31 B' \quad (0.5 \text{ MHz}) \end{aligned}$$

Modulador NTSC

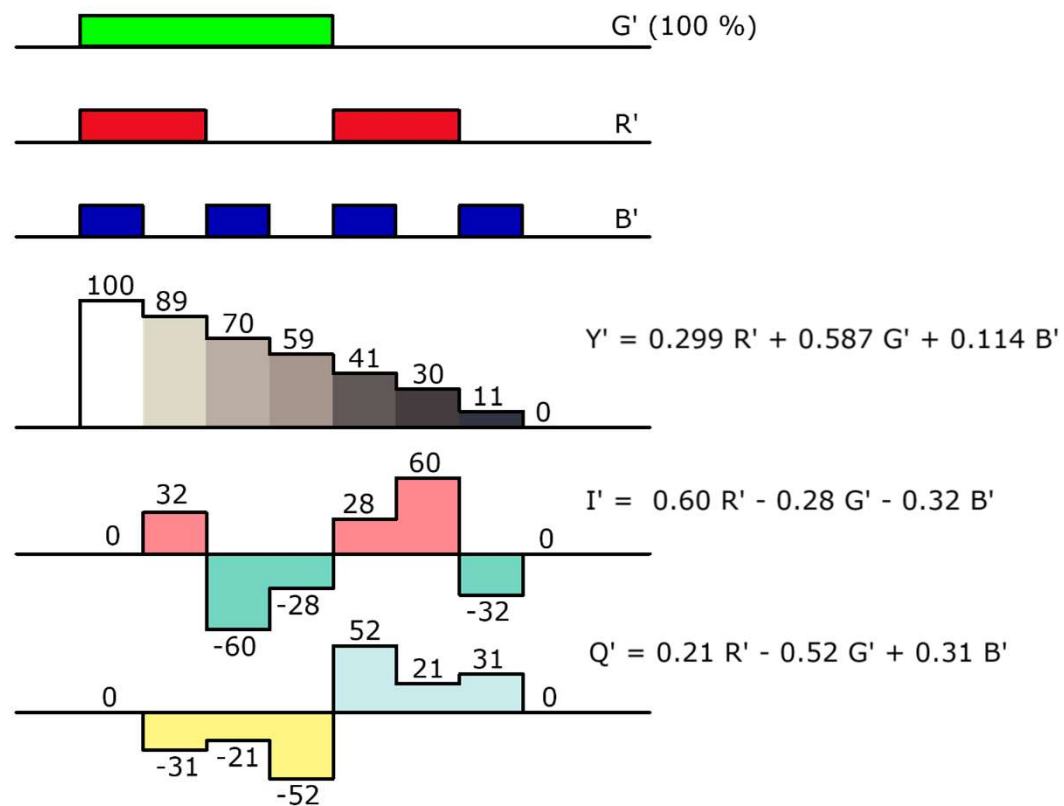


Exemplo: Padrão de Barras Coloridas (RGB)

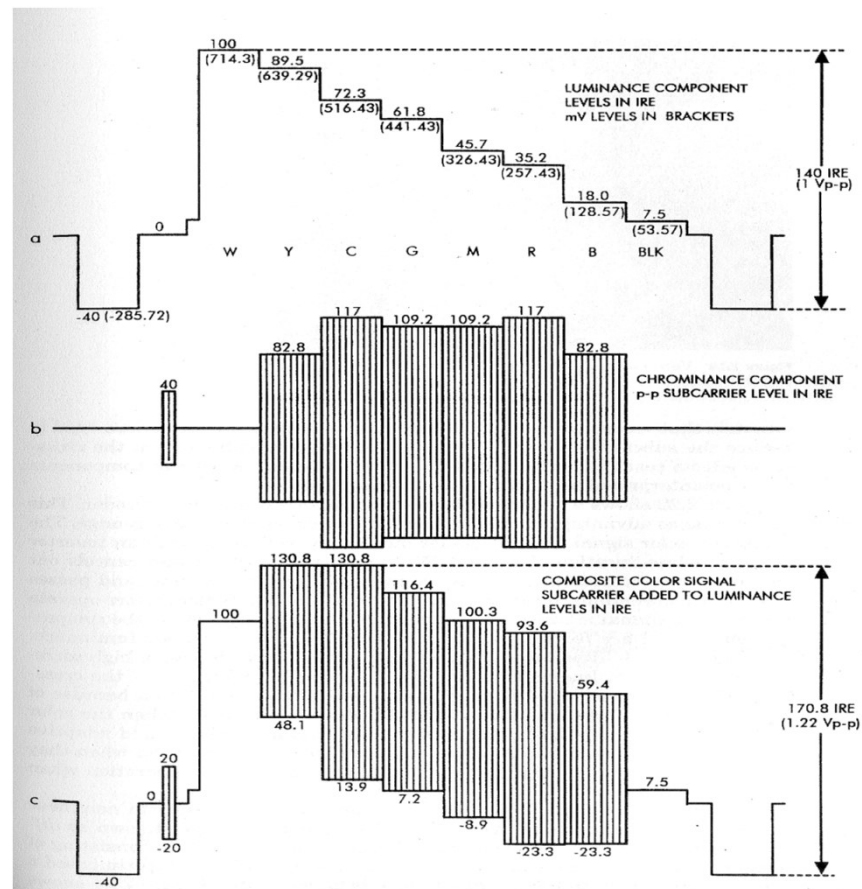
LCS
EPUSP



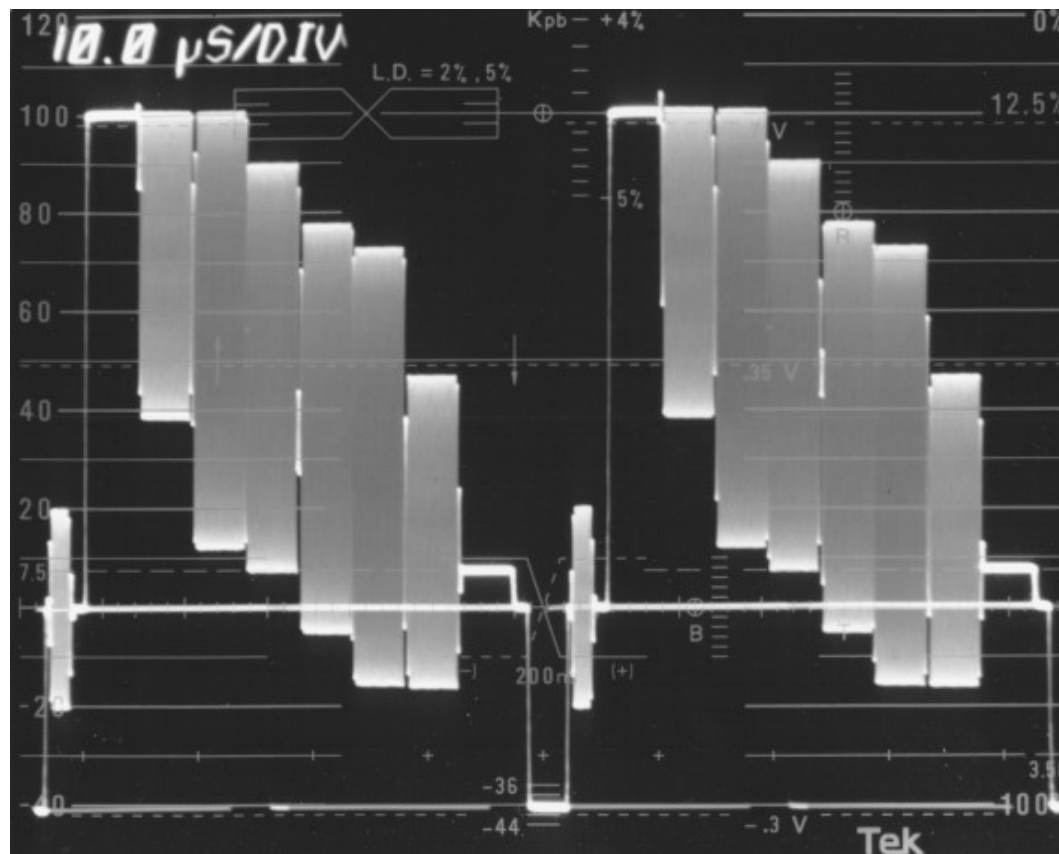
Padrão de Barras YIQ



Formas de Onda na Modulação NTSC

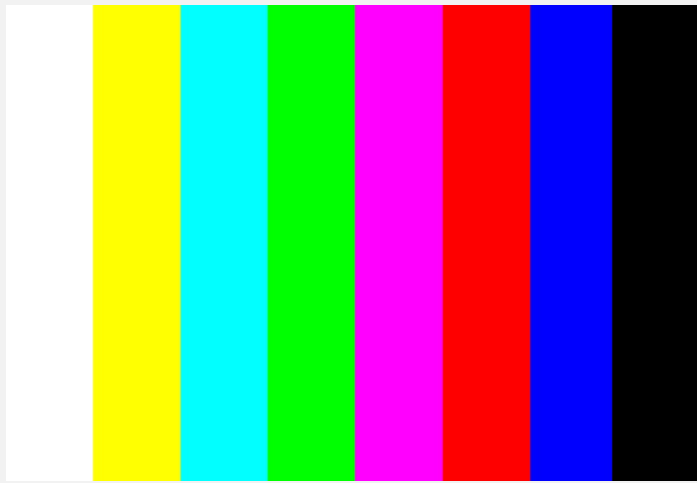


Padrão de Barras Modulado em NTSC

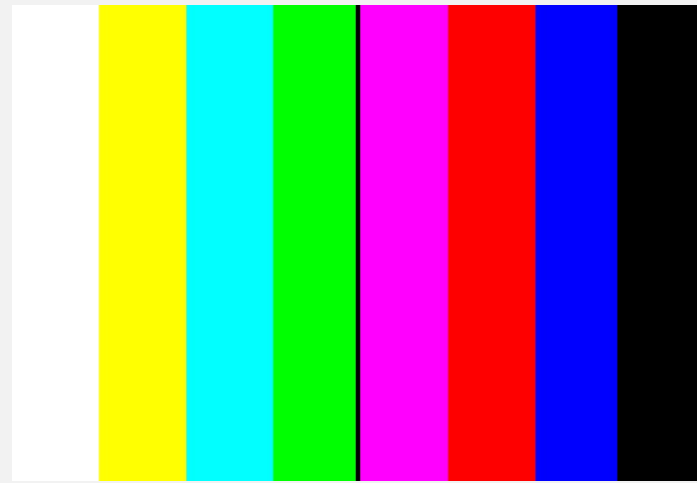


Erro na Reprodução da Luminância

LCS
EPUSP



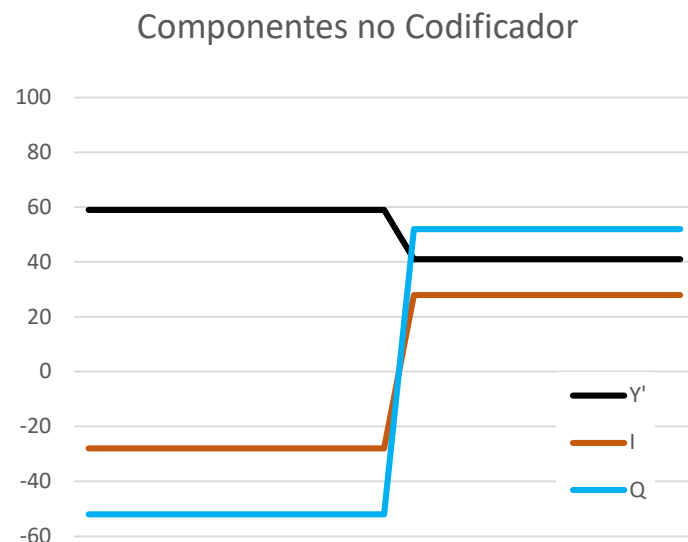
Transmissor



Receptor

Erro na Reprodução da Luminância

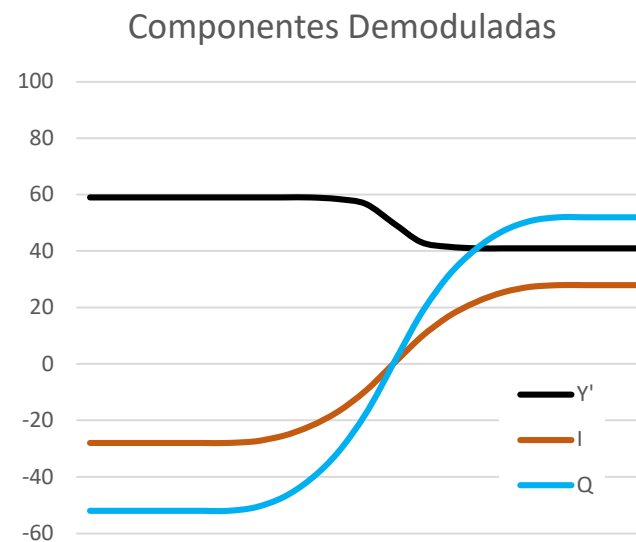
Transição de Verde para Magenta:



$$Y' = 0,299R' + 0,587G' + 0,114B'$$

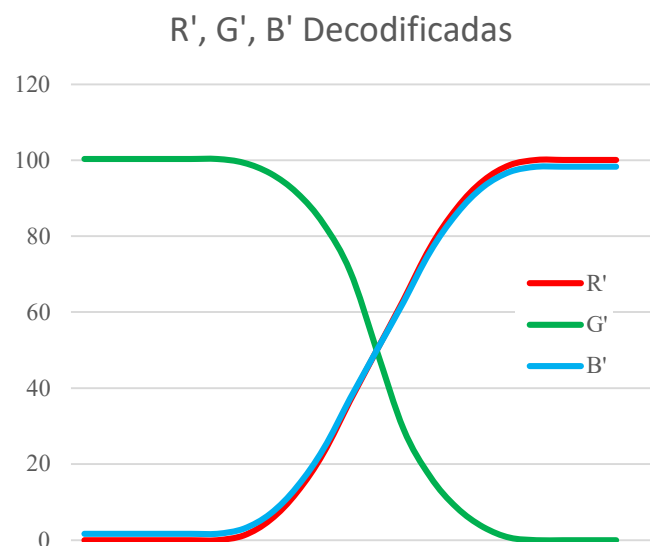
$$I = 0,60R' - 0,28G' - 0,32B'$$

$$Q = 0,21R' - 0,52G' + 0,31B'$$

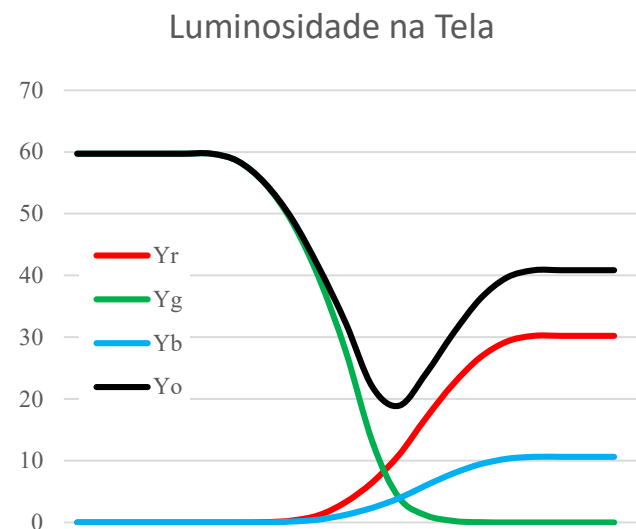


I e Q com banda passante menor que Y'

Erro na Reprodução da Luminância

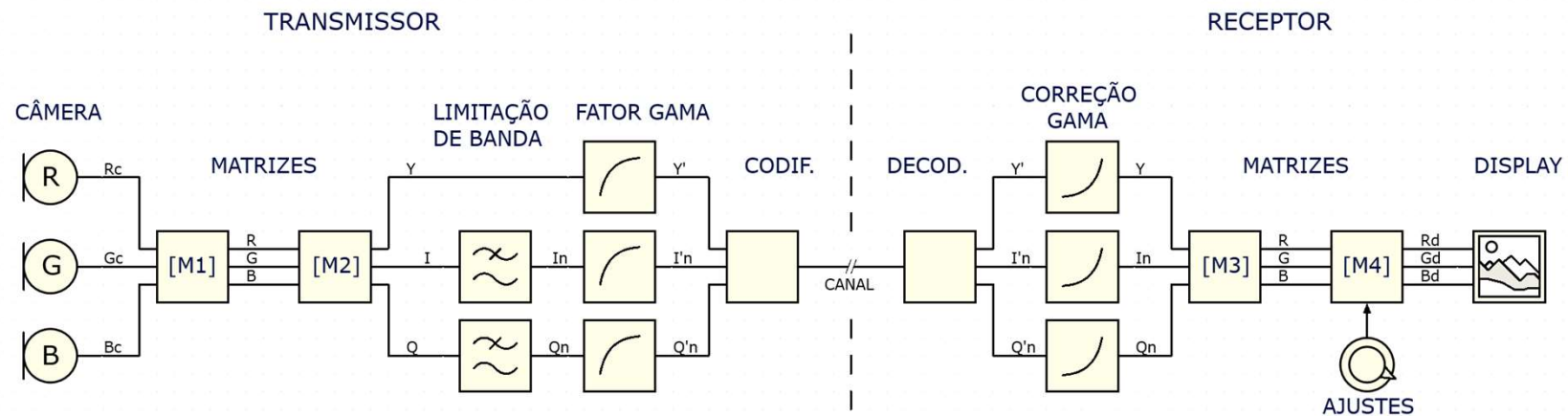


$$\begin{aligned}R' &= Y' + 0,96 I + 0,62 Q \\G' &= Y' - 0,27 I - 0,65 Q \\B' &= Y' - 1,11 I + 1,70 Q\end{aligned}$$



$$Y_o = 0,299 R'^{\gamma} + 0,587 G'^{\gamma} + 0,114 B'^{\gamma}$$

Como deveria ser para manter Luminância Constante



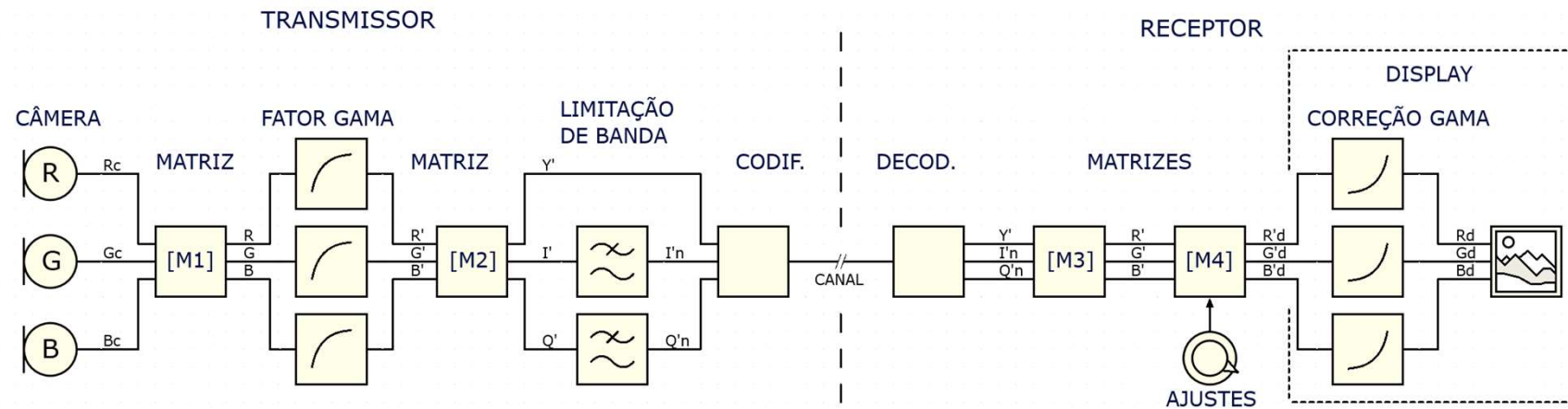
M1: Equaliza colorimetria da câmera; R, G e B de acordo com cromaticidade padrão

M2: Cria Y, I e Q de acordo com resolução espacial da visão

Fator Gama: aplica correção perceptual para otimizar relação S/R no canal

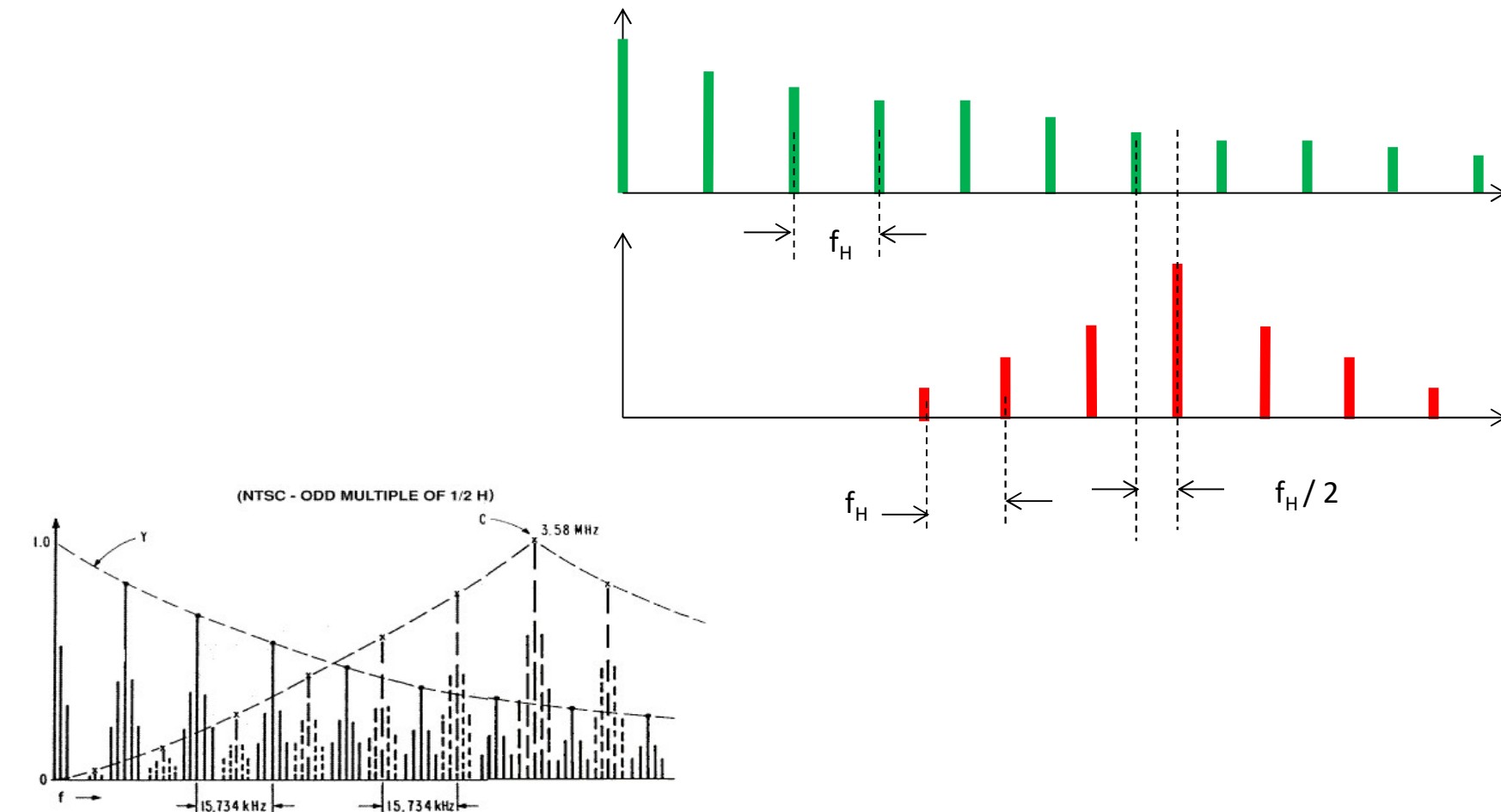
M3: matriz inversa de M2

M4: Equaliza colorimetria para primários do Display e conforme ajustes



Display com Tubo de Raios Catódicos possui correção Gama intrínseca.
Aplicação do fator Gama no transmissor mudou de lugar.

Intercalamamento Espectral



Intercalamento Espectral no Tempo

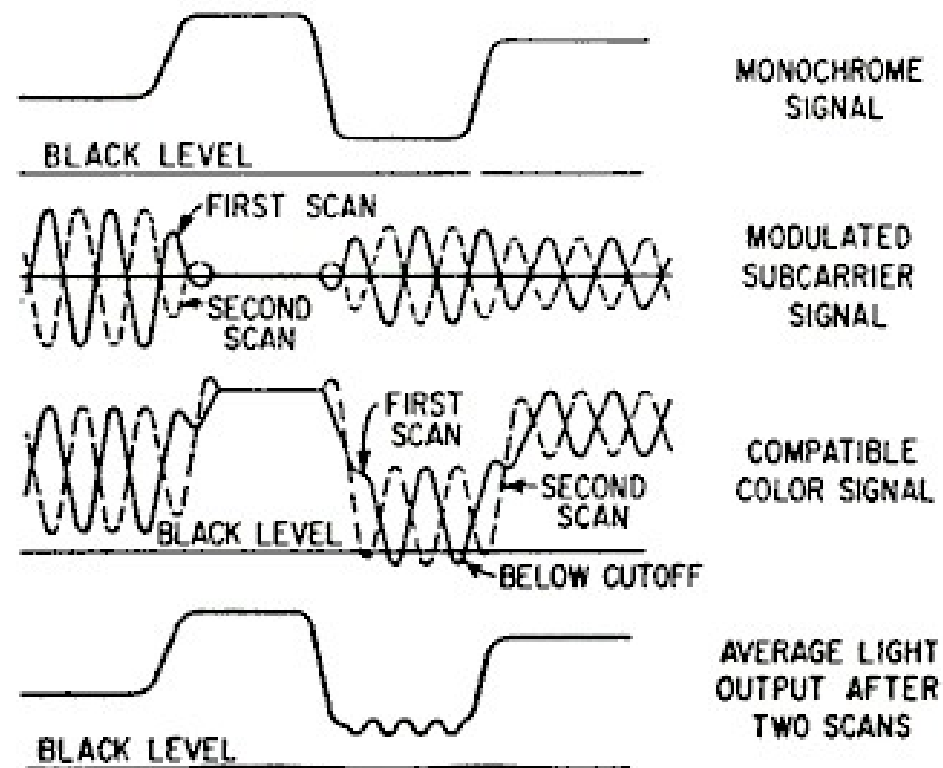
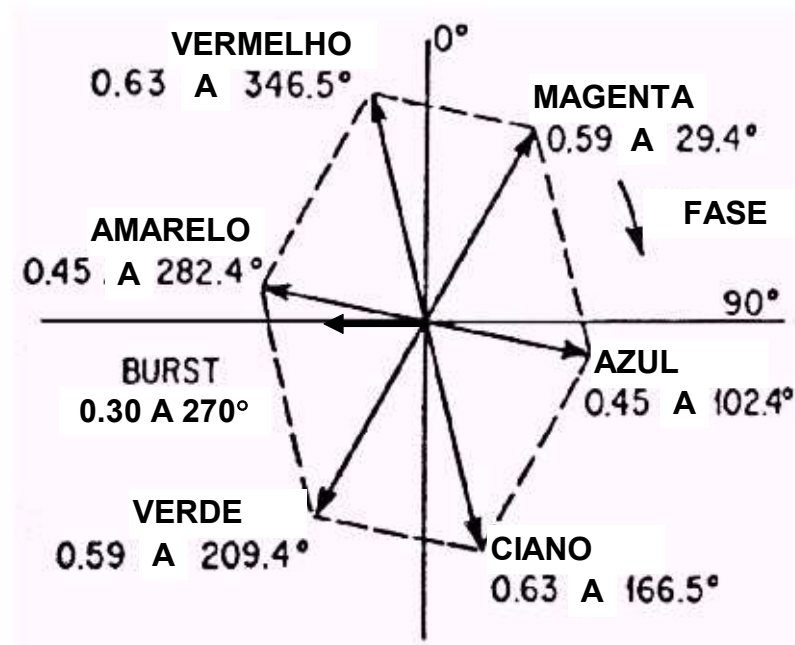
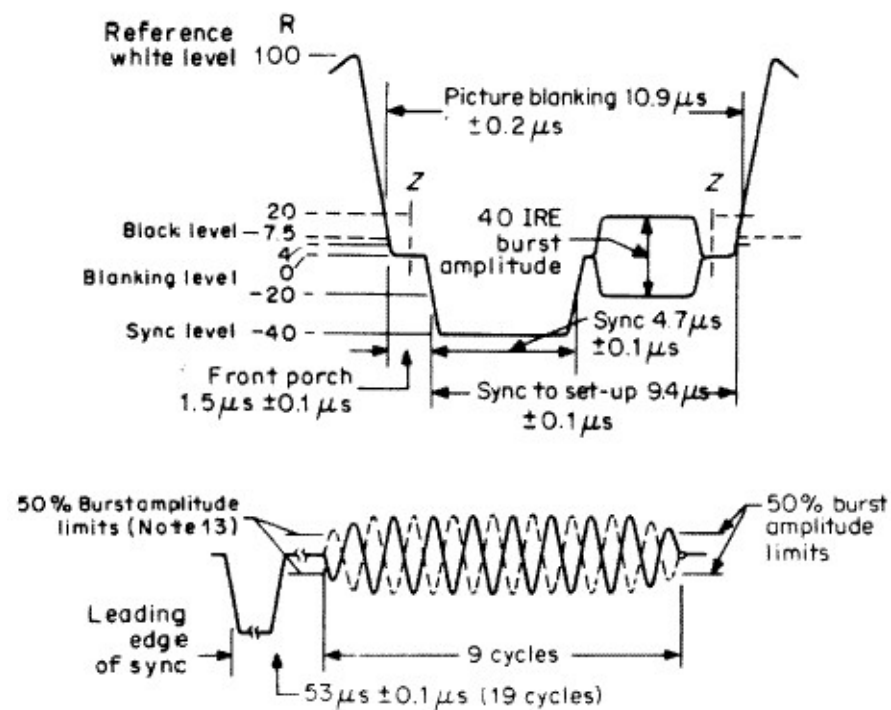


Diagrama Fasorial da Sub-portadora de Crominância

LCS
EPUSP



Referência de Fase: “Burst”



Intercalamento Espectral:

$$f_{SC} = (2n+1)/2 \times f_H$$

$$f_{SC} - 4.5 \text{ MHz} = (2p+1)/2 \times f_H$$

frequências multiplicadas por 1000/1001 $\Rightarrow$

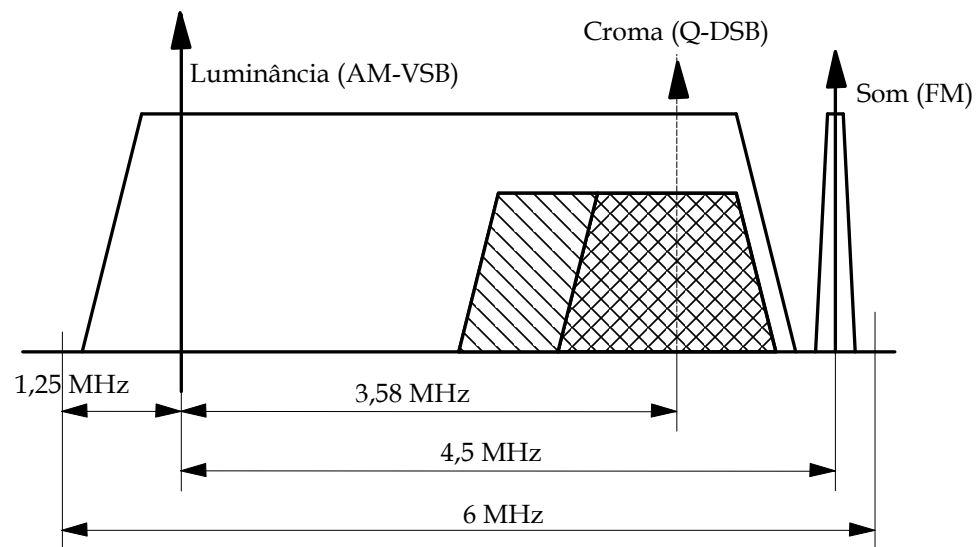
$$f_H = 15734,265... \text{ Hz} \Rightarrow f_V = 59.94 \text{ Hz}$$

$$f_{SC} = 455/2 f_H = 5 \times 7 \times 13 / 2 f_H = 3.579545 \text{ MHz}$$

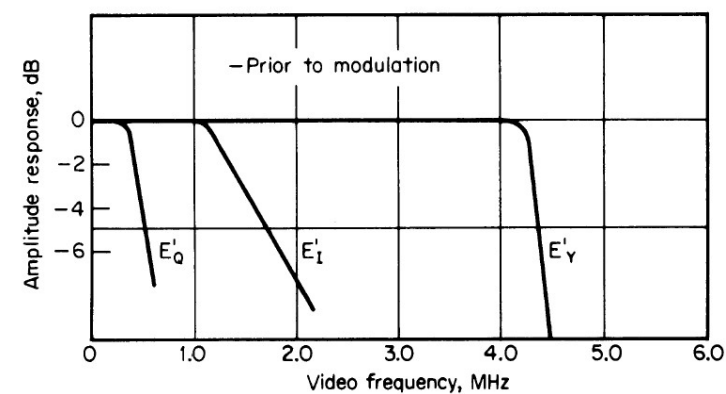
$$f_Q = \frac{1}{2} f_V = 29.97 \text{ Hz}$$

Espectro de um Canal NTSC

LCS
EPUSP

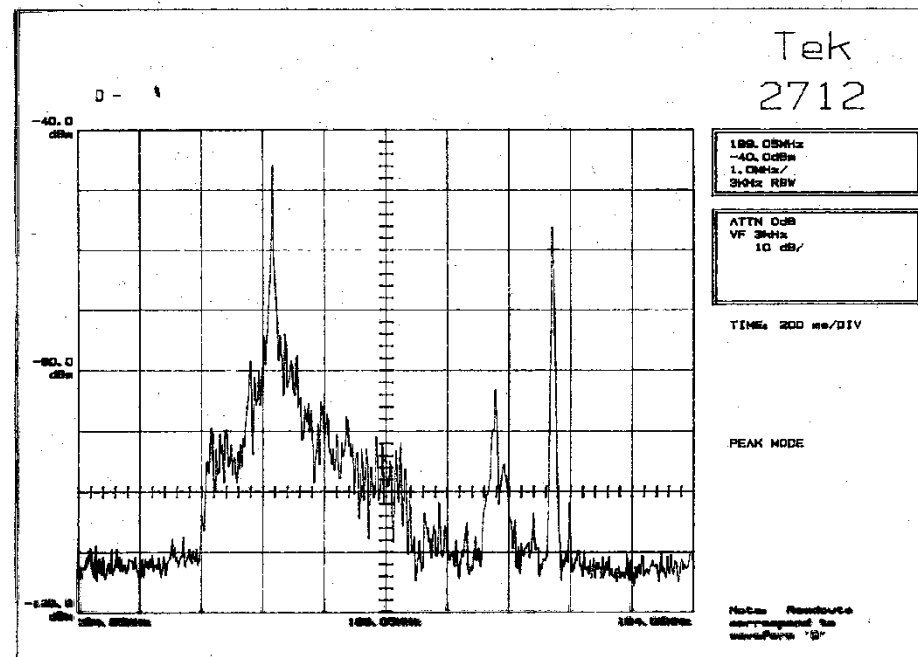


Limitação de Banda dos sinais Y, I e Q

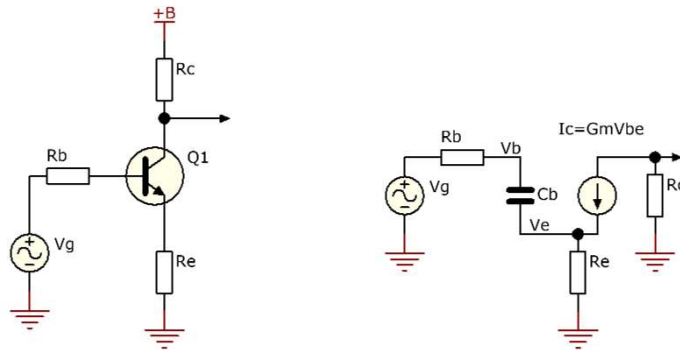


Espectro Real de um Canal de TV

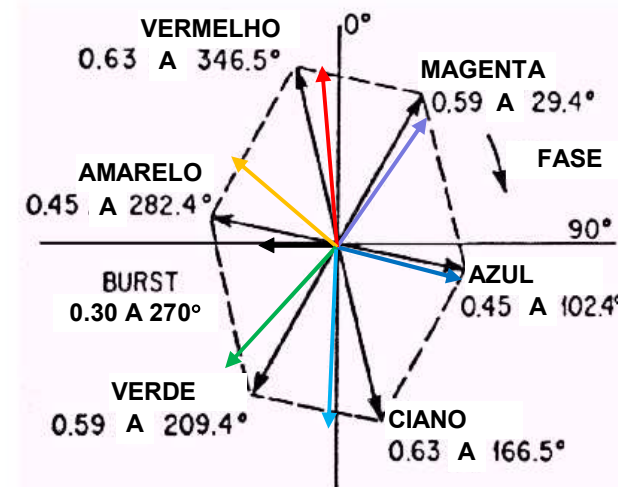
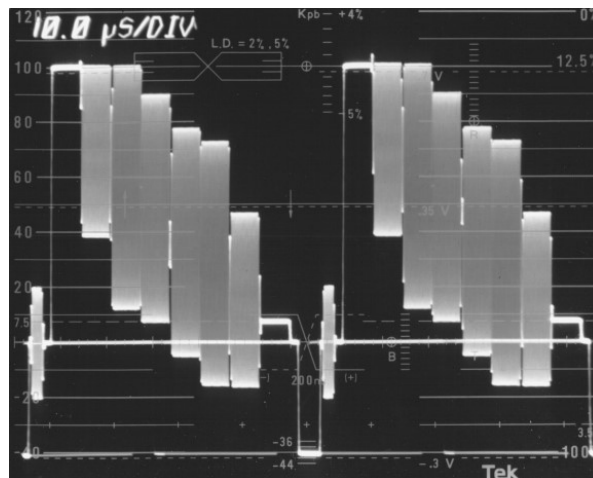
LCS
EPUSP



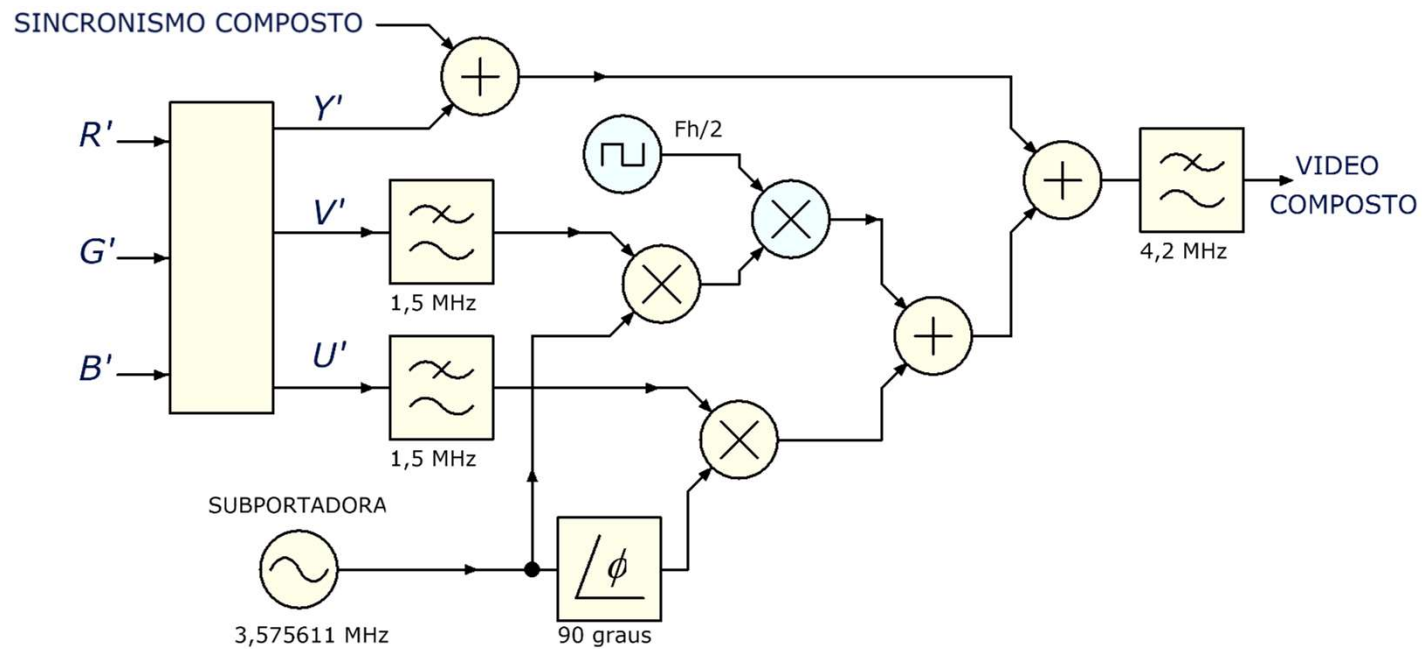
Erro de Fase Diferencial



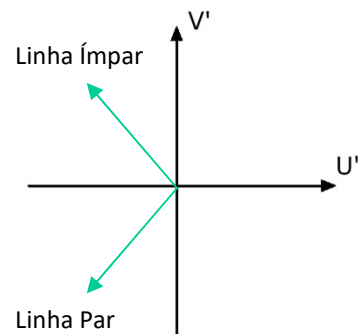
*Luminância (corrente média)
afeta a defasagem da sub-
portadora pela variação de C_b*



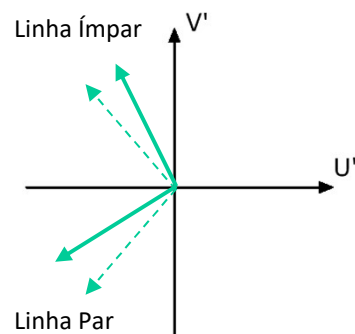
Modulador PAL-M



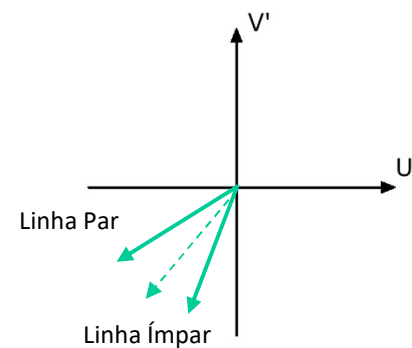
Inversão de Fase com Alternância



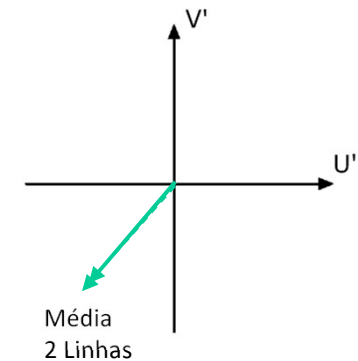
*Fasor Transmitido
com inversão*



*Fasores Recebidos
com Erro de Fase*

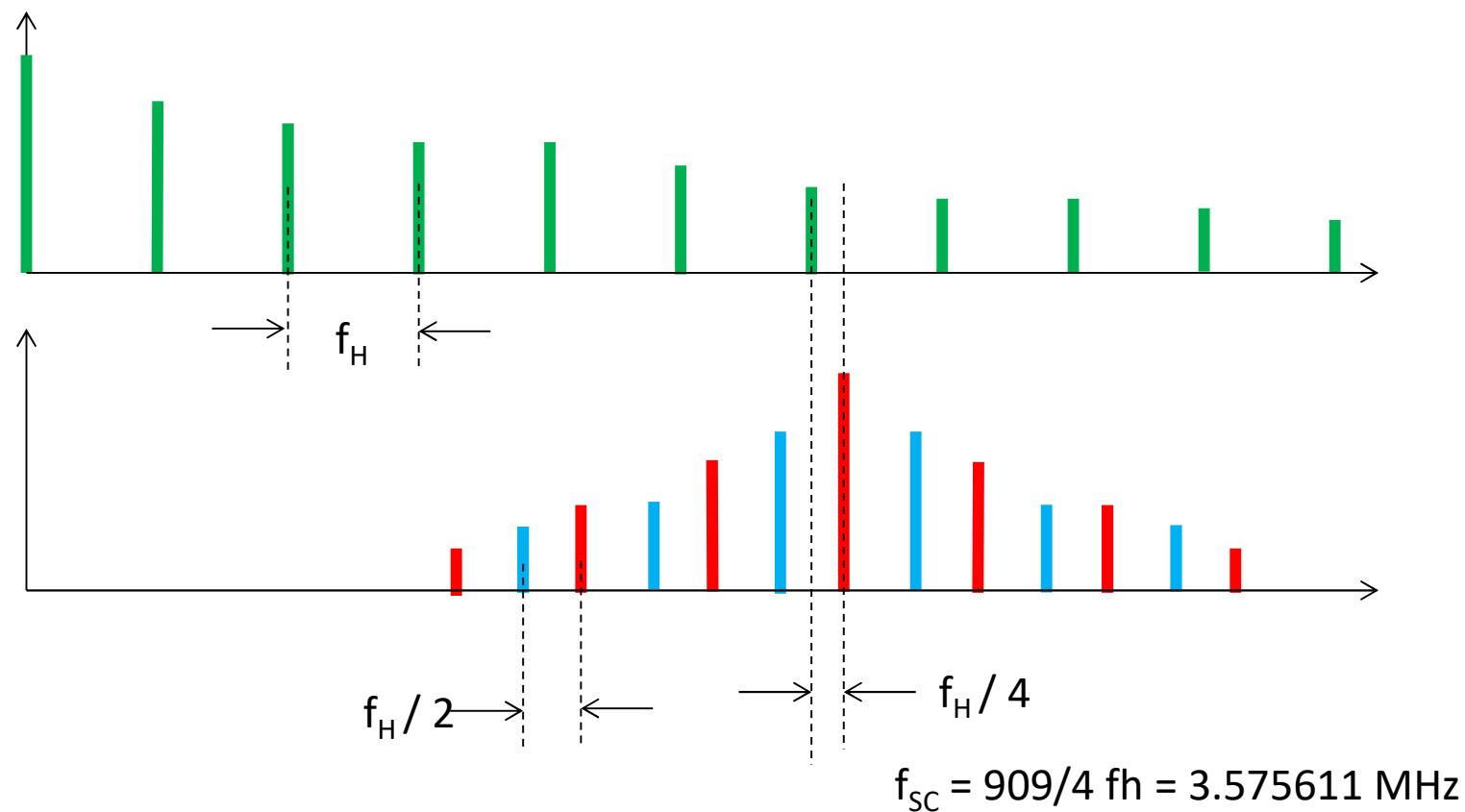


*Fasores Recebidos
após desinversão*

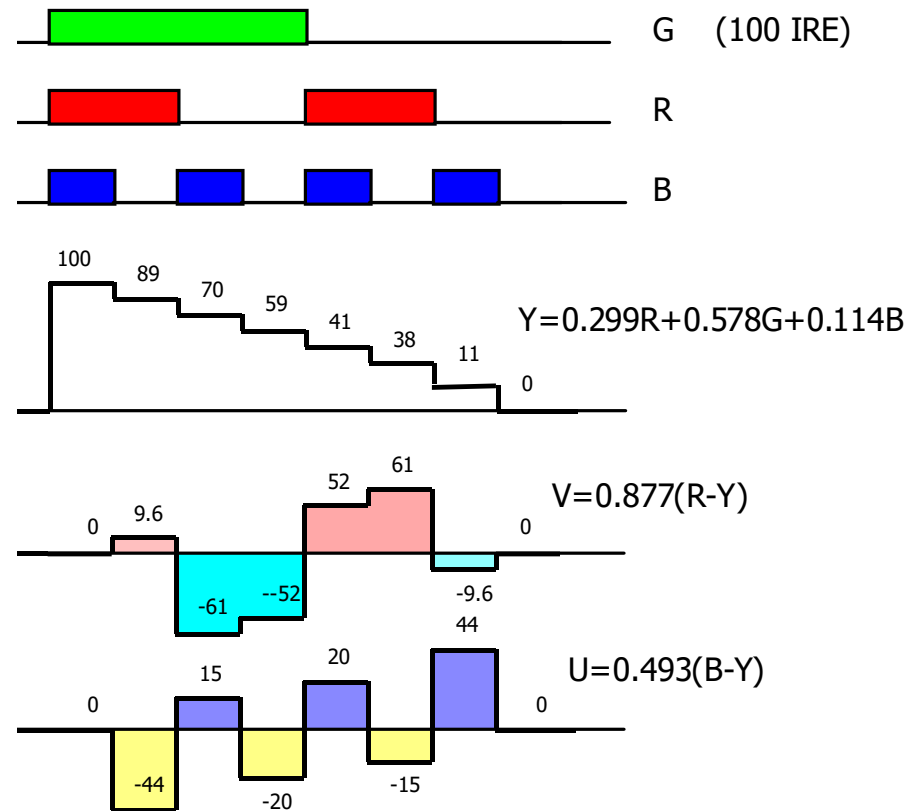


*Fasor Médio sobre
2 linhas
Consecutivas*

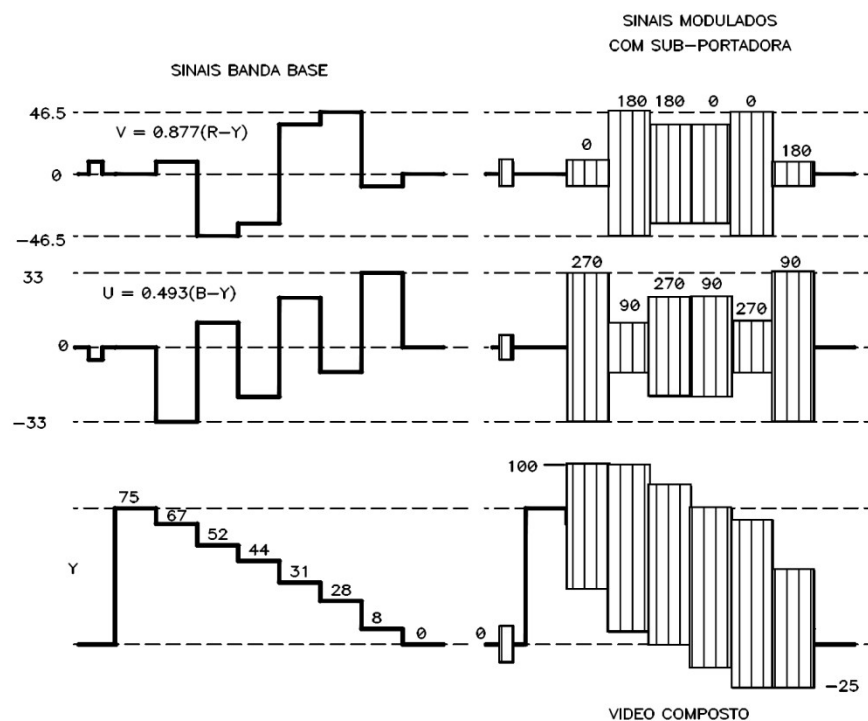
Intercalamamento Espectral no PAL-M



Padrão de Barras YUV



Formas de Onda na Modulação PAL-M



(Padrão de Barras com 75% do Fundo de Escala)

PAL-B/G/H/I (Europa)

50 Hz / 625 linhas

$f_{sc} = 4,433618 \text{ MHz}$

$B_W(Y) = 5 \text{ MHz}$ (padrões B/G/H)

ou 5,5 MHz (padrão I)

$B_W(\text{canal}) = 7 \text{ MHz (B) ou } 8 \text{ MHz (G/H/I)}$

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

PAL-N (Argentina, Paraguai, Uruguai)

50 Hz / 625 linhas

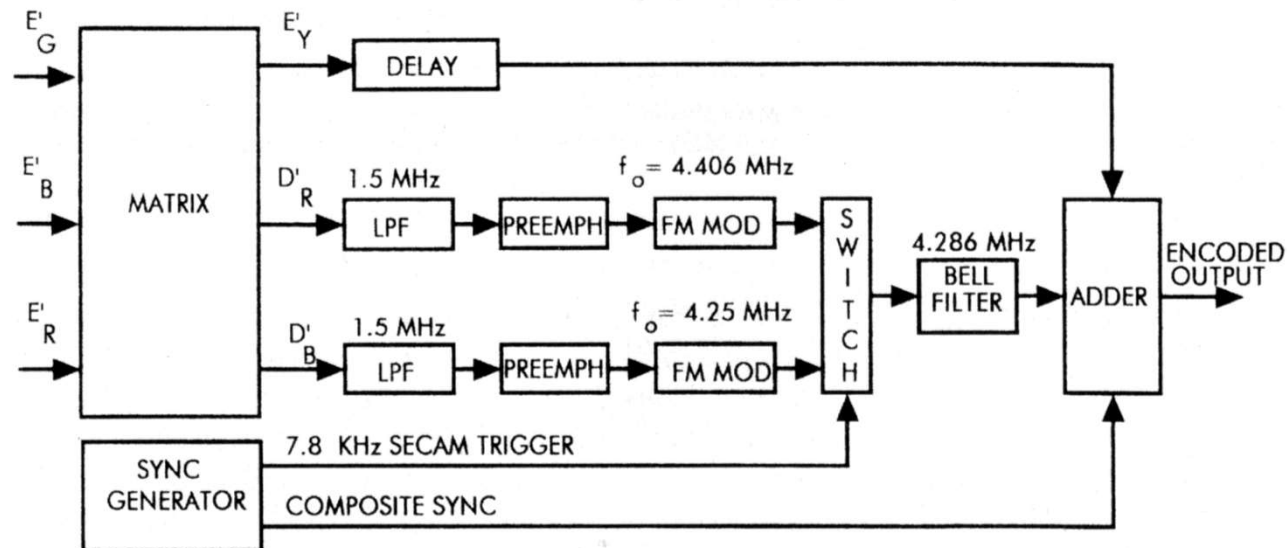
$f_{sc} = 3,582056 \text{ MHz}$

$B_W(Y) = 4,2 \text{ MHz}$

$B_W(\text{canal}) = 6 \text{ MHz}$

(Resolução diferente na Vertical e Horizontal)

SECAM (França, URSS)



SECAM: Séquentiel Couleur Avec Mémoire

Formas de Onda no Sistema SECAM

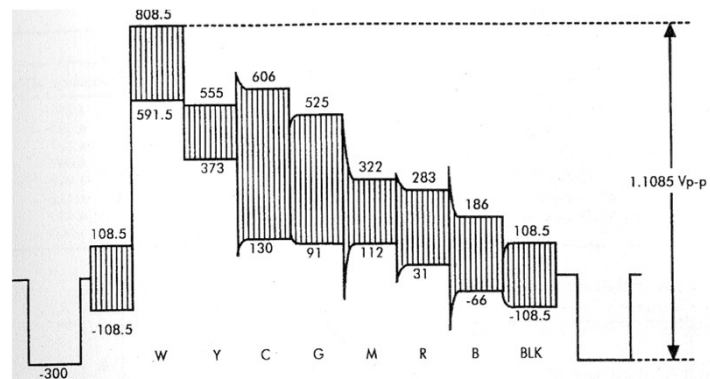
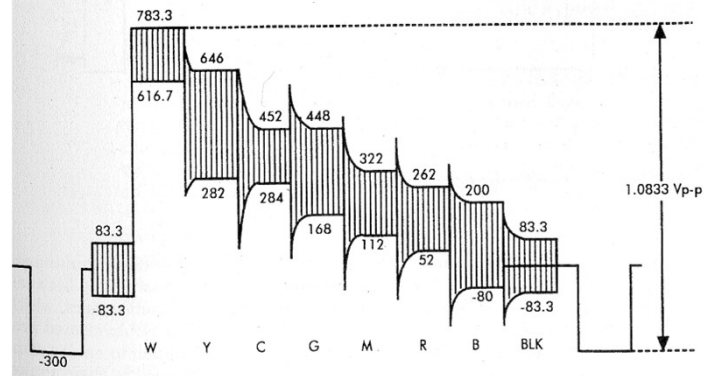


Figure 2.48 SECAM 100/0/75/0 color bars red line signal waveform.



S-VHS (Super-Video)

Sinais separados para Luminância (Y' + Sync)
e cromaticidade (I' , Q' e “burst”
modulados em 3,58 MHz)

Componentes (YUV)

Sinais Y' , $(R' - Y')$ e $(B' - Y')$ separados
Aplicação profissional, DVD, Blu-Ray etc.

HDCVI (NTSC-HD)

Vídeo Composto Analógico para Alta Definição

Aplicações: Câmeras de Vigilância via cabo coaxial

Adaptação do NTSC para 1080p / 30:

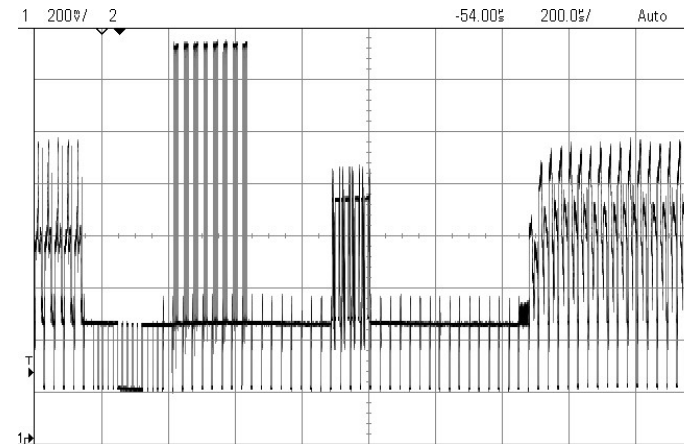
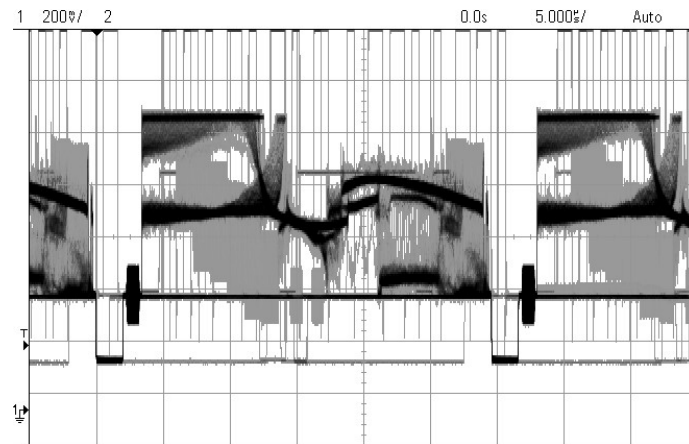
$$f_v = 30,00 \text{ Hz}$$

$$f_h = 33750 \text{ kHz} = 1125 \times f_v$$

$$f_{sc} = 24,04687 \text{ MHz} = f_h \times 1425/2$$
$$(1425 = 3 \times 5 \times 5 \times 19)$$

HDCVI 1080p / 30 Hz

LCS
EPUSP



$$T_V = 33,333 \text{ ms}$$

$$= 1125 \times T_H$$

$$T_{VBL} = 1,33 \text{ ms}$$

$$= 45 \times T_H$$

$$f_H = 33,75 \text{ kHz}$$

$$= 1125 \times 30$$

$$T_H = 29,629 \mu\text{s}$$

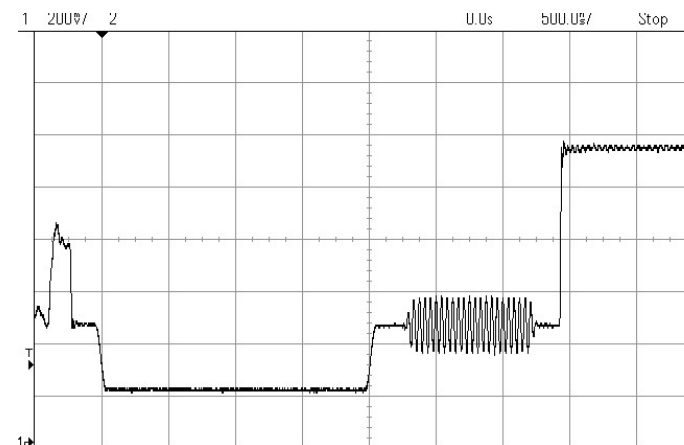
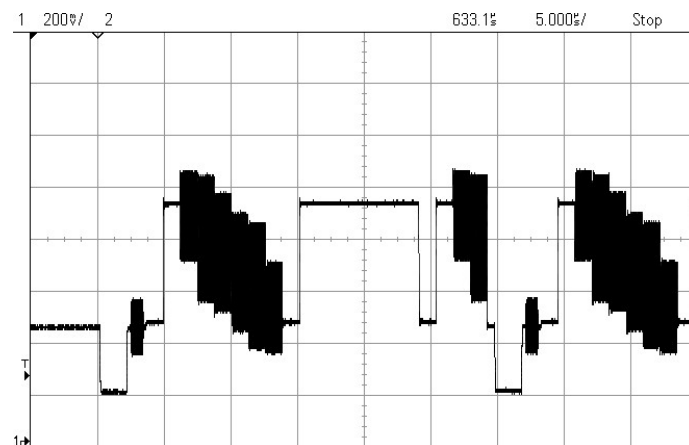
$$T_{HBL} = 3,2 \mu\text{s}$$

$$T_{HS} = 2 \mu\text{s}$$

$$T_{BURST} = 1 \mu\text{s}$$

$$f_{SC} = 24,0467 \text{ MHz}$$

$$= \frac{1425}{2} \times f_H$$

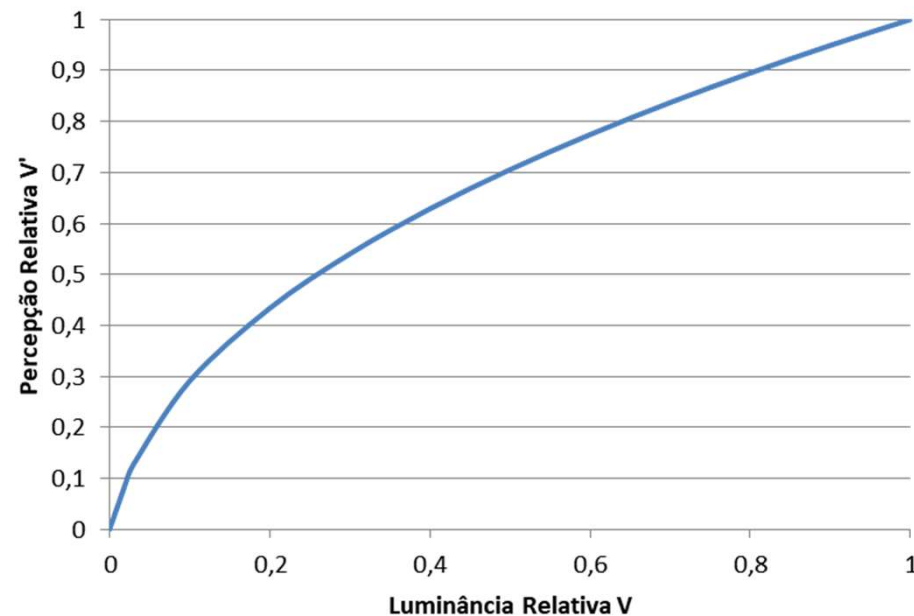


Colorimetria para HDTV e UHDV

Aproximação da Curva de Percepção de Brilho

$$V' = \begin{cases} 4,5 \times V & 0 \leq V < 0,018 \\ 1,099 \times V^{0,45} - 0,099 & 0,018 \leq V \leq 1 \end{cases}$$

Recomendação
ITU-R BT.709



SMPTE 274M / ITU-R BT.709

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

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

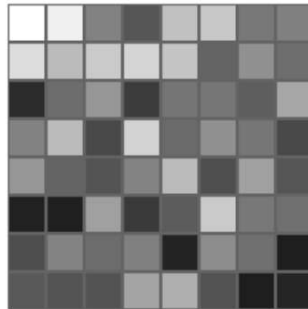
$$P_B' = \frac{1}{1.8556} (B' - Y')$$

$$P_R' = \frac{1}{1.5748} (R' - Y')$$

SMPTE: Society of Motion Picture and Television Engineers

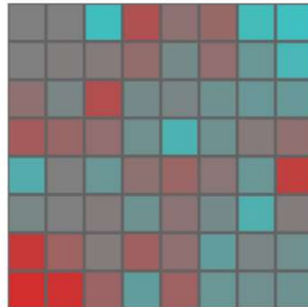
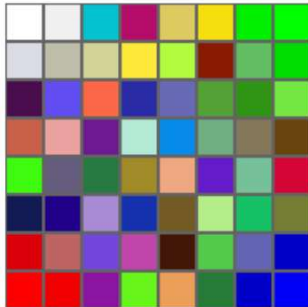
ITU-R: International Telecommunications Union - Radiocommunication

Representação de Cores por Oponentes



Luminância:

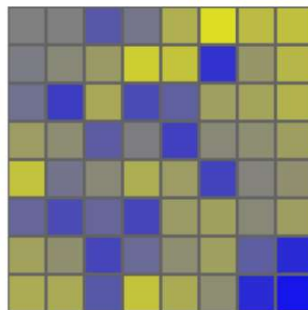
$$Y' = 0.2627 R' + 0.6780 G' + 0.0593 B'$$



Crominância:

$$P_R' = \frac{1}{1.4746} (R' - Y')$$

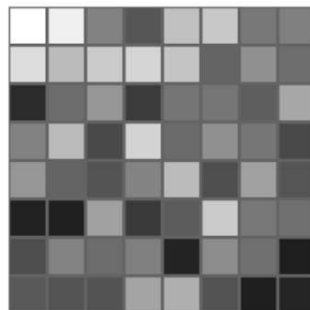
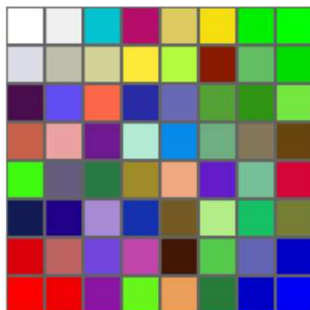
Recomendação
ITU-R BT.709



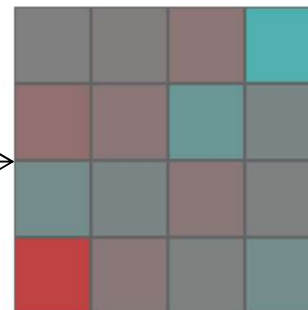
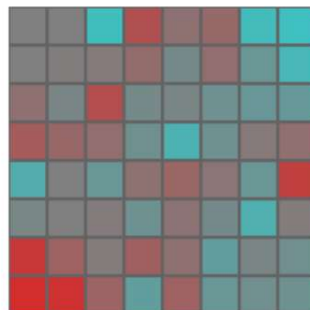
$$P_B' = \frac{1}{1.8814} (B' - Y')$$

Decimação das Oponentes Cromáticas

64 pixels

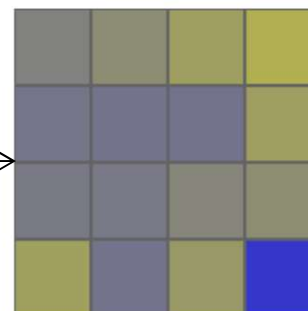
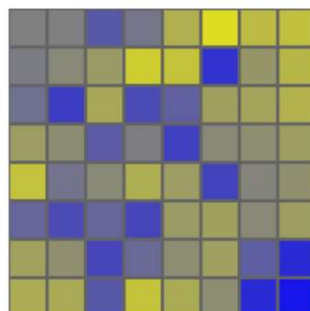


64 amostras de Luminância

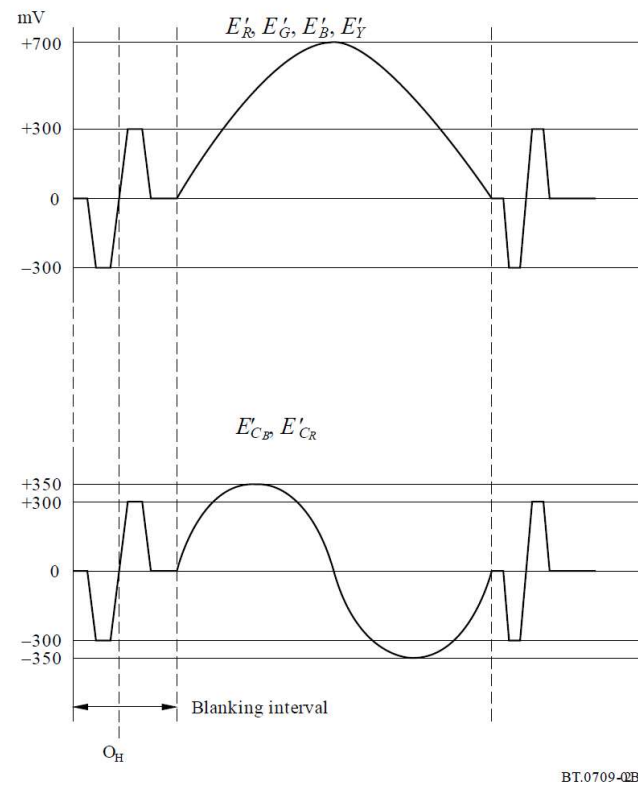


16 + 16
amostras de
Crominância

Recomendação
ITU-R BT.709



SMPTE 274M / ITU-R BT.709



Colorimetria para UHDV (WCG - “Wider Color Gamut”)

ITU-R BT.2020

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

$$V' = \begin{cases} 4.5 \cdot V & 0 \leq V \leq 0.0181 \\ 1.0993 \cdot V^{0.45} - 0.0993 & 0.0181 \leq V \leq 1 \end{cases}$$

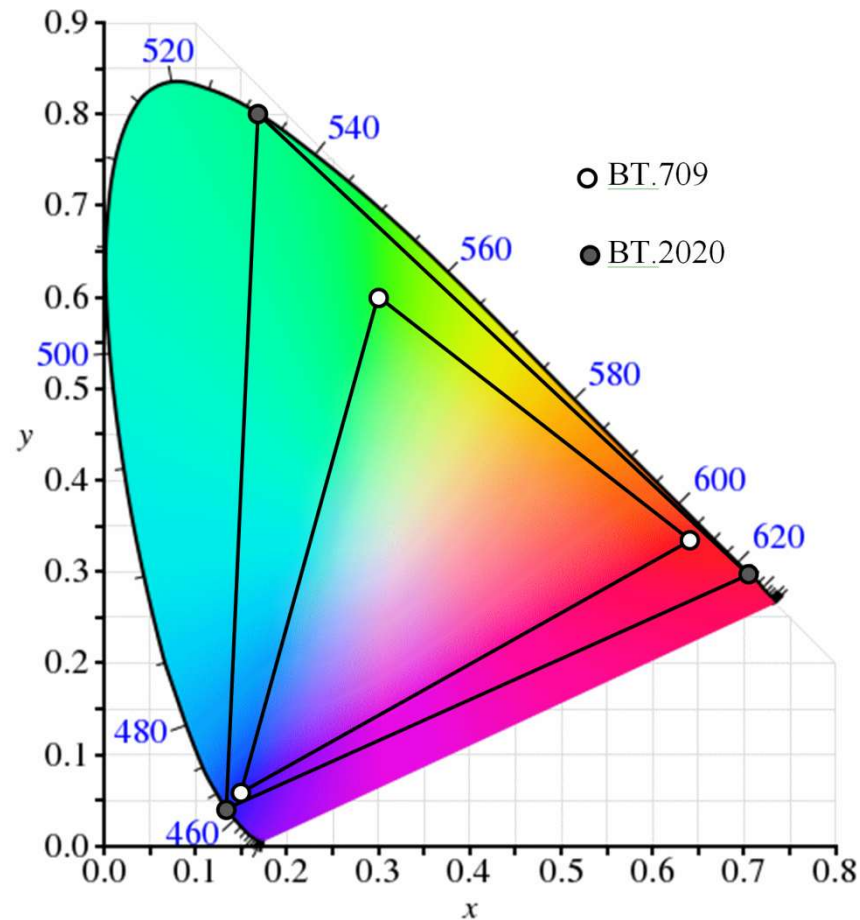
$$Y' = 0.2627 R' + 0.6780 G' + 0.0593 B'$$

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

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

Colorimetria para UHDV (WCG - “Wider Color Gamut”)

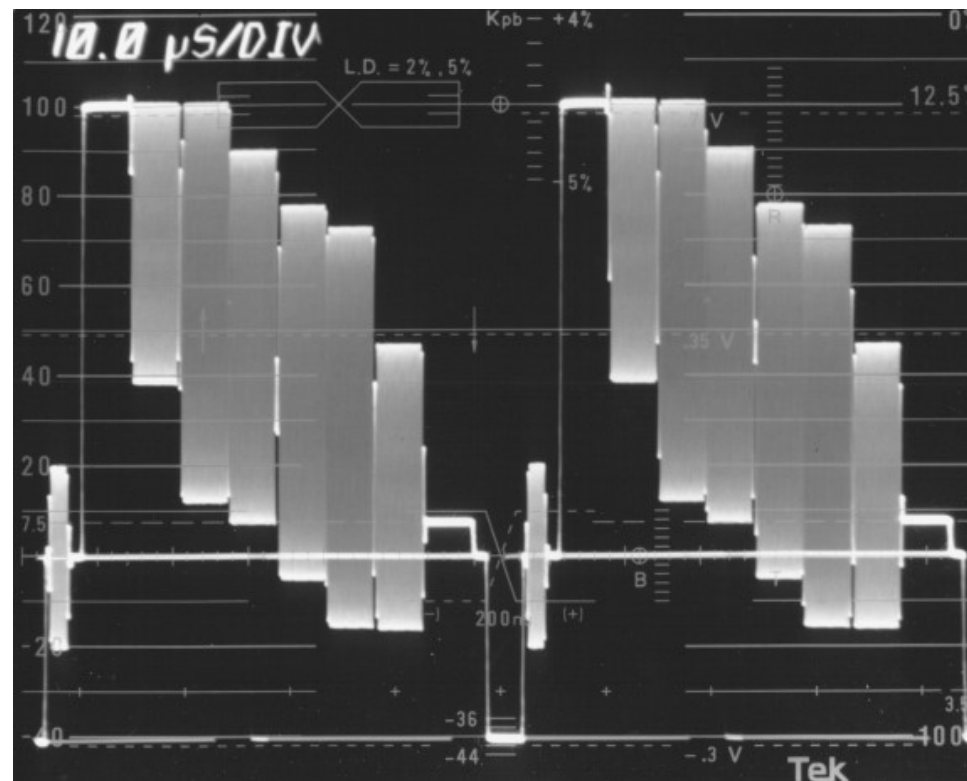
LCS
EPUSP



- Leis de Grassmann são aproximadamente válidas, em faixas restritas de luminosidade e comprimentos de onda.
- Distribuição de Cones R, G e B na retina é irregular, seja em relação ao campo visual, seja de um indivíduo para outro.
- Diferenças genéticas na composição dos pigmentos nas células da retina.
- Idade influi, pelo amarelamento da córnea.
- Porém, o sistema visual consegue reduzir as diferenças de percepção, muito abaixo do que seria esperado pelas diferenças físicas.

Equipamentos e Sinais de Teste para TV

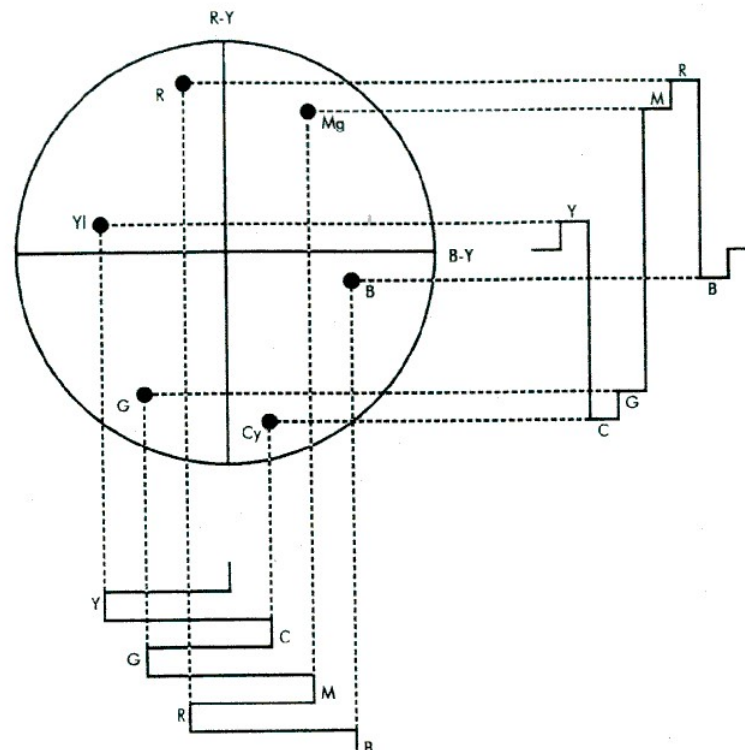
Monitor de Forma de Onda



2H

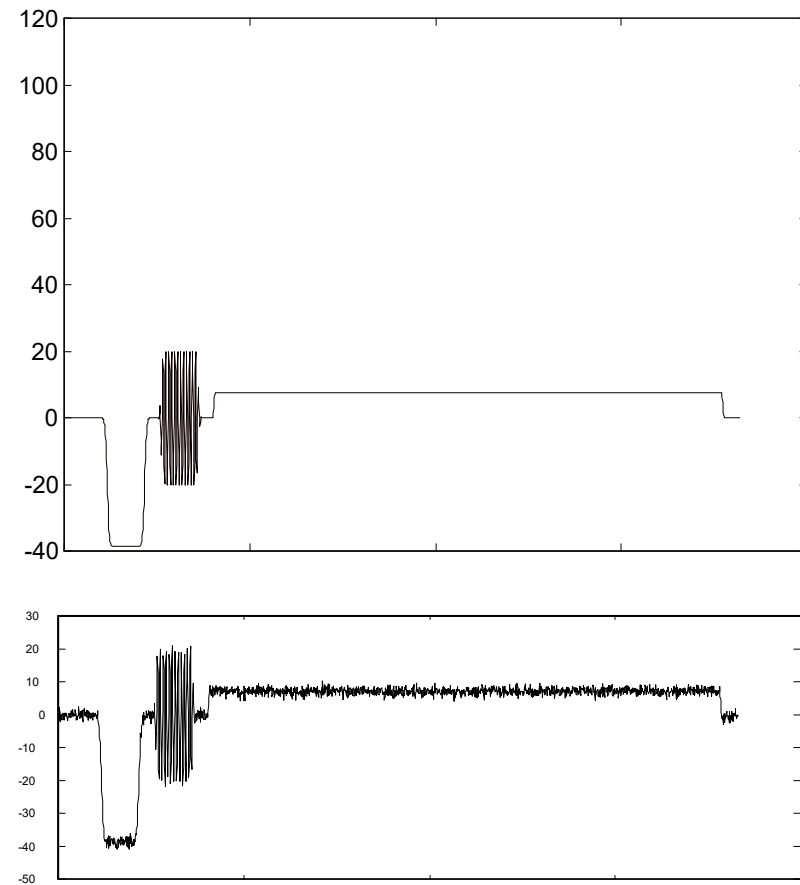
Vetorscópio

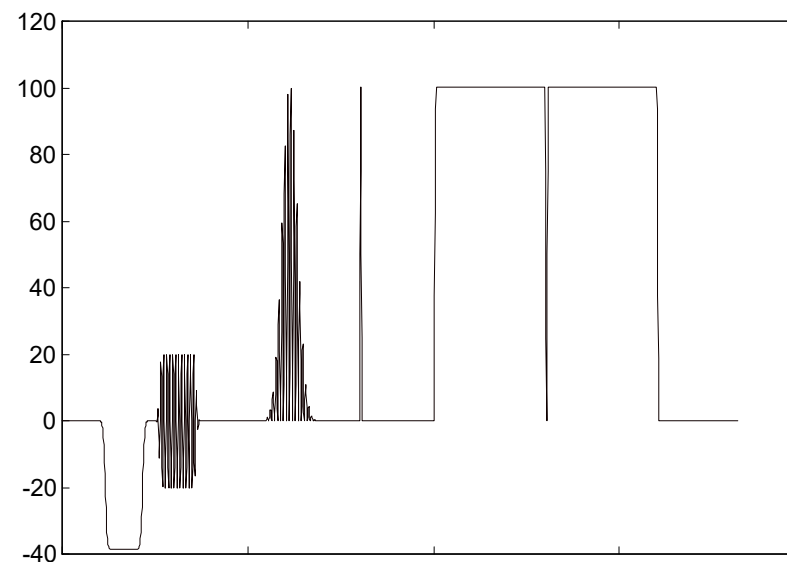




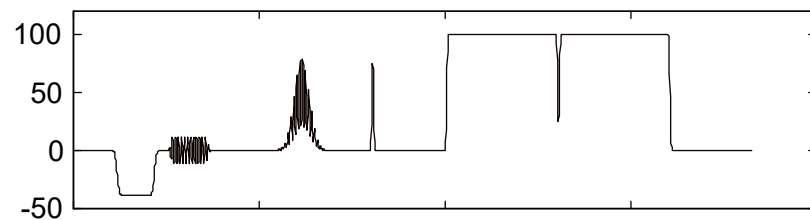
Sinais de Teste: “Black Burst”

Sinal com presença de
ruído aditivo

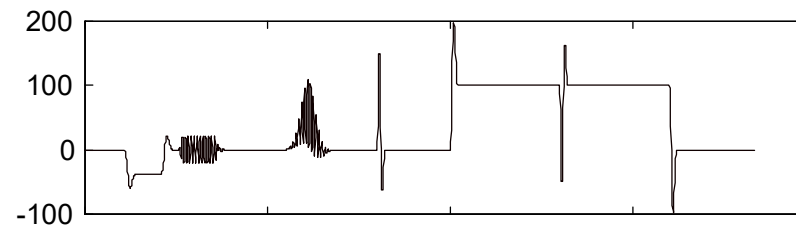




Atenuação do sinal de croma:

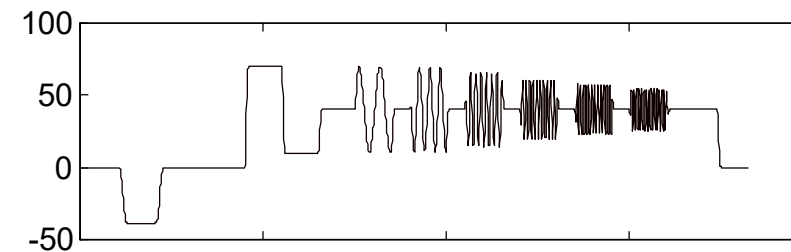
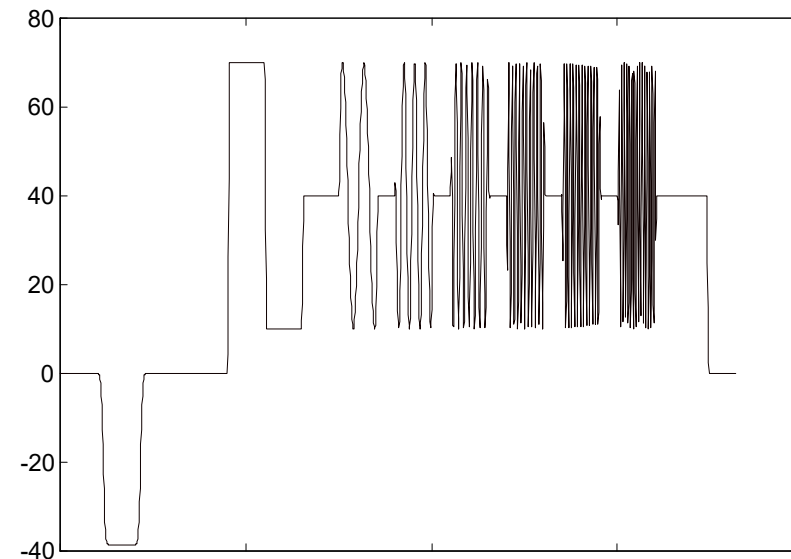


Atraso do sinal de croma:



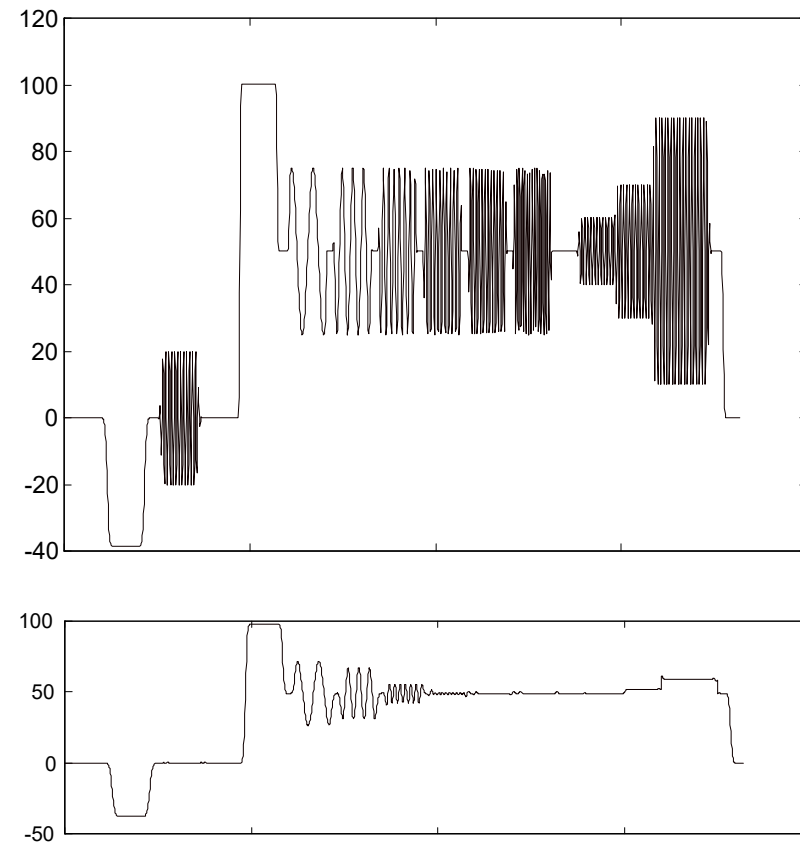
Multiburst (0.5, 1, 2, 3, 3.58, 4.2 MHz)

Efeito da limitação da
resposta em frequência:



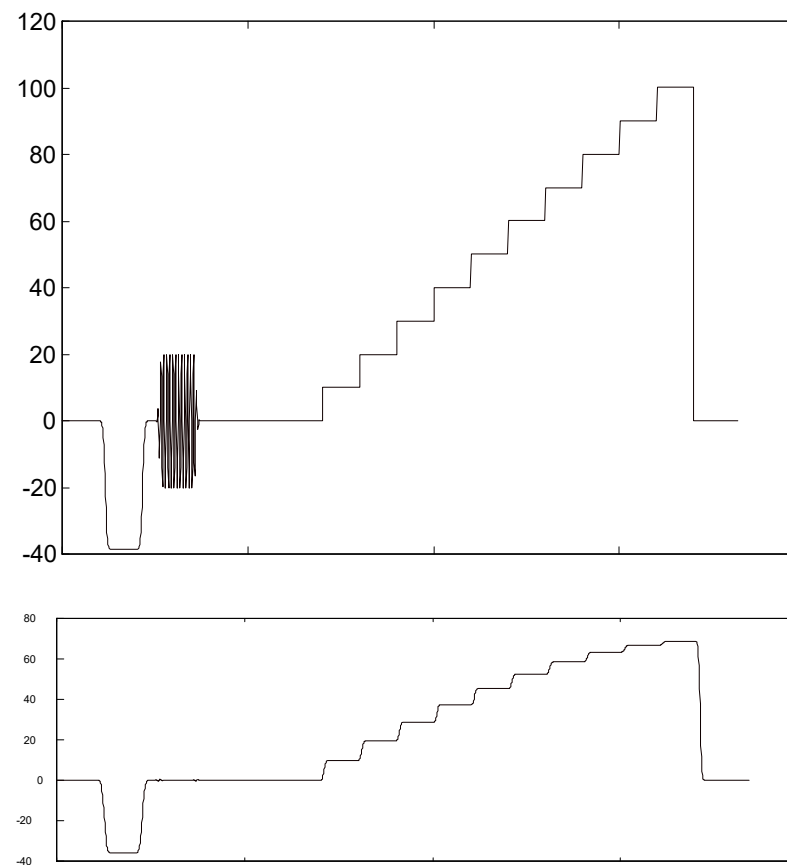
Combinado NTC7 (Multiburst + Escada)

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



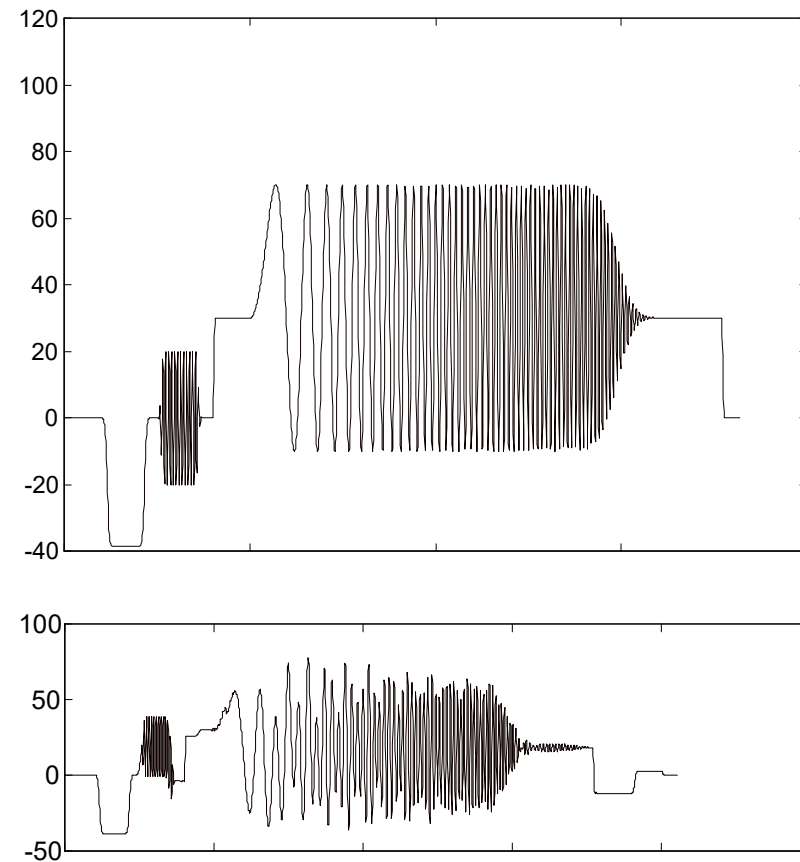
Escada de Luminância

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



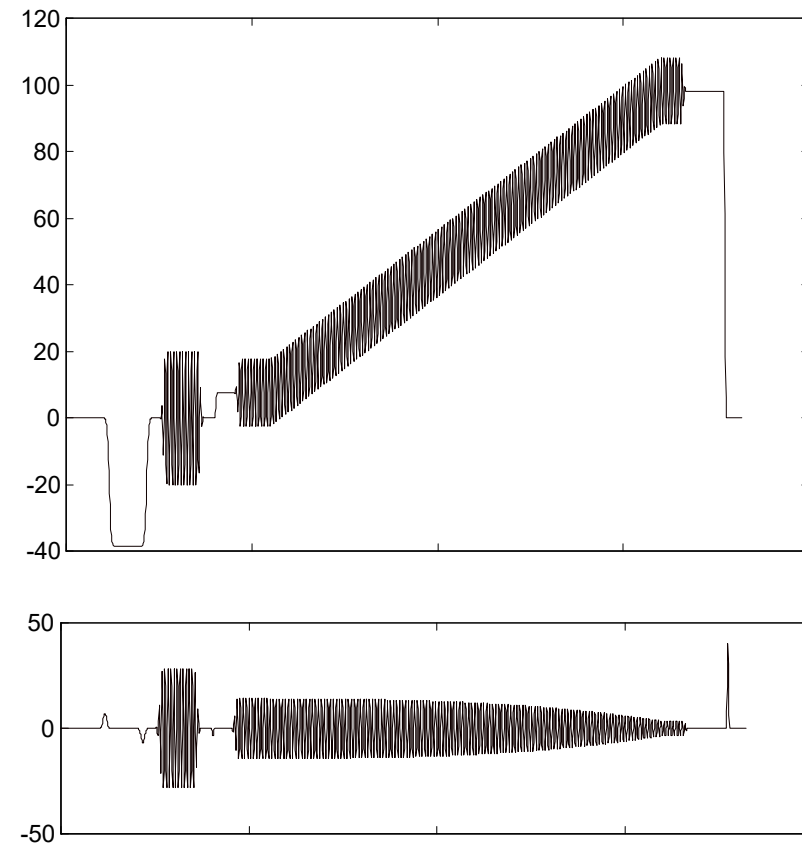
GCR (Ghost Cancelling Reference)

Efeito de multipercurso na
recepção do GCR:



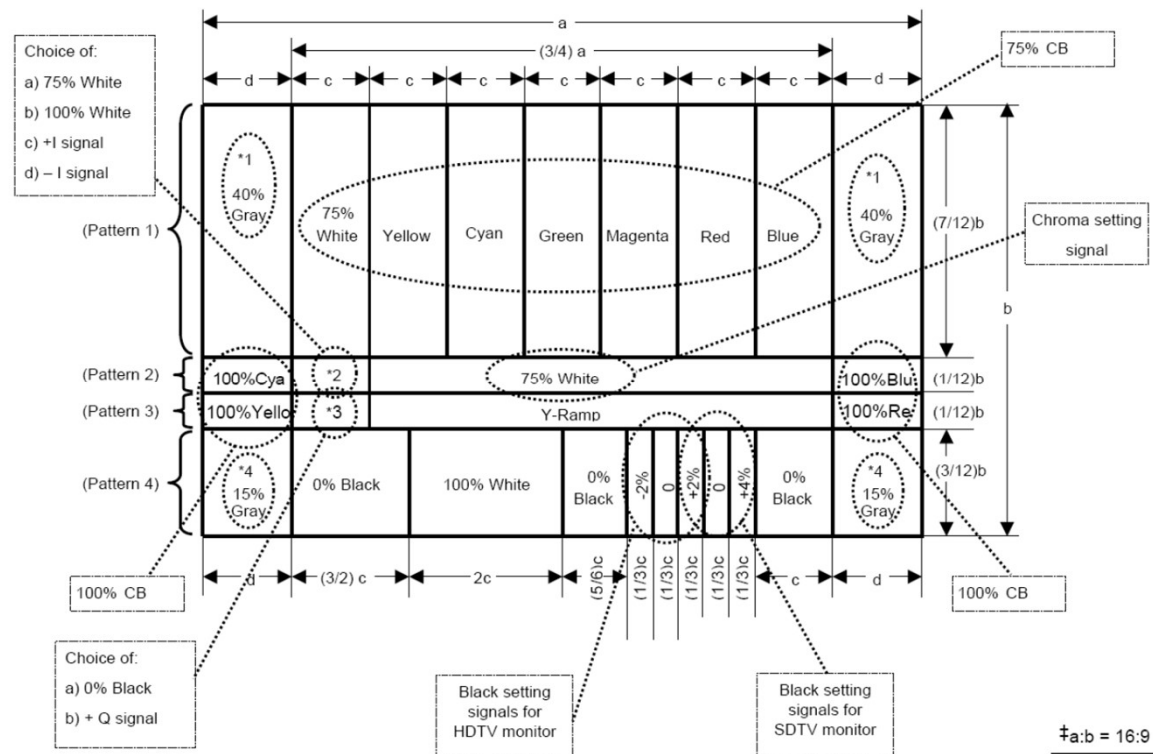
Rampa Modulada

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



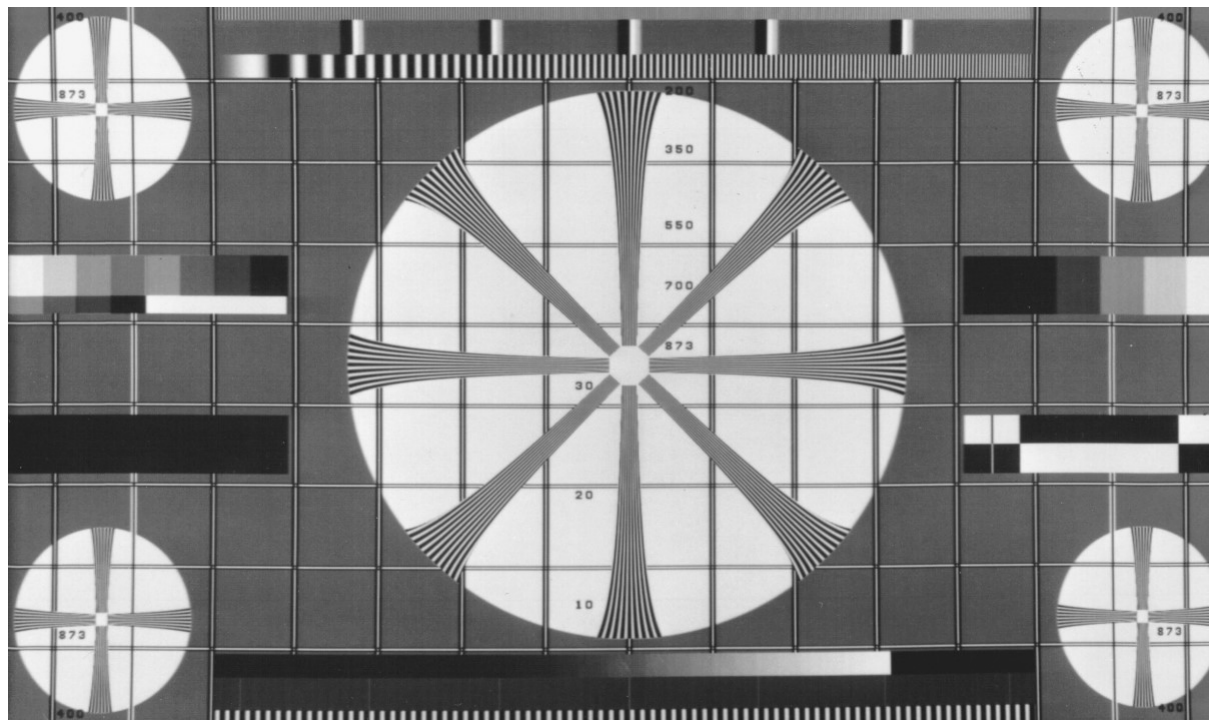
Sinal de Teste para TV de Alta Definição

Padrão de barras SMPTE RP219 / ARIB STD-B28



Sinal de Teste para TV de Alta Definição

Padrão de Teste de Resolução

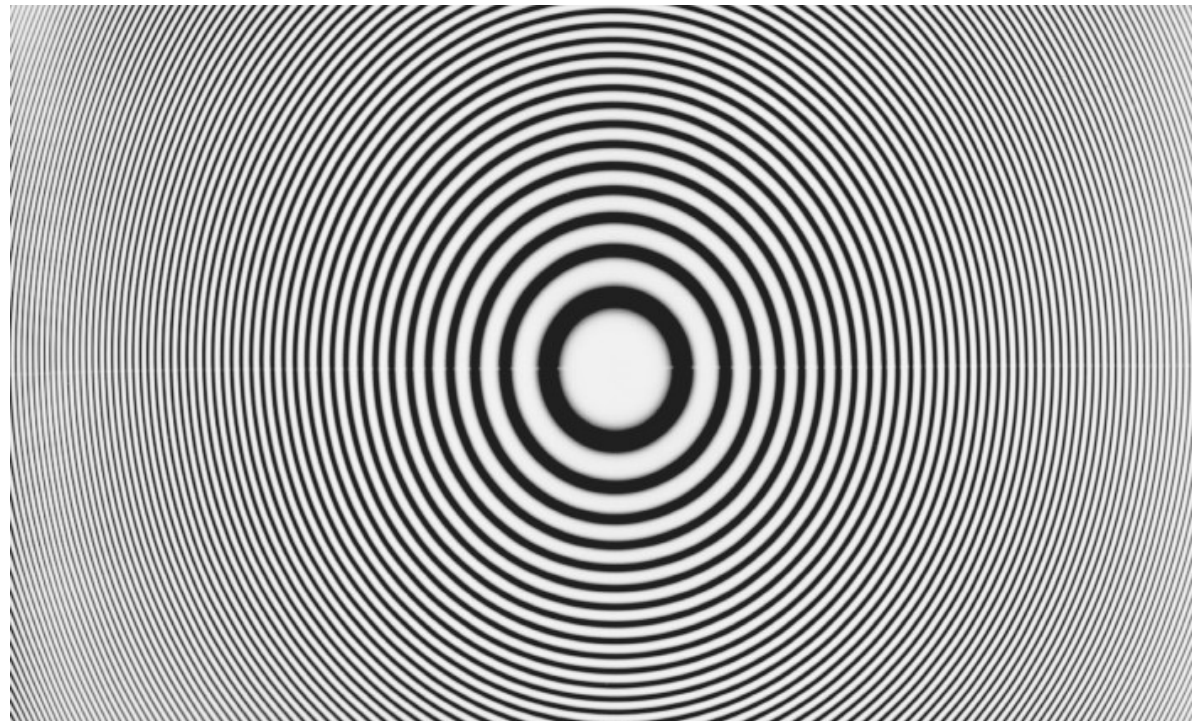


(Tektronix)

Sinal de Teste para TV de Alta Definição

LCS
EPUSP

Padrão “Zone Plate” com varredura de frequência vertical e horizontal

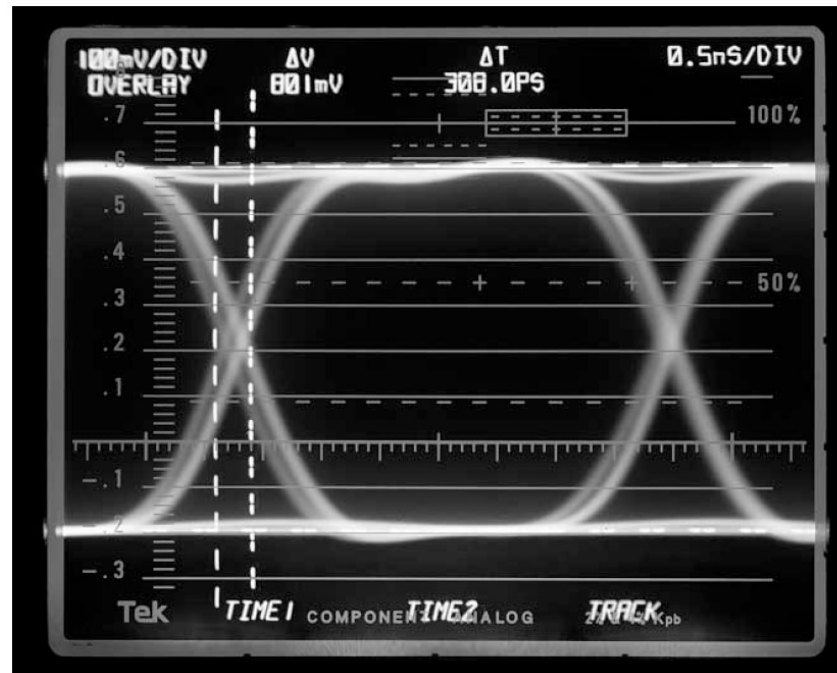


(Tektronix)

Sinal de Teste para TV Digital

LCS
EPUSP

Diagrama de Olho para interfaces digitais



(Tektronix)

NTSC = Never Twice the Same Color

SECAM = System Essentially Contrary to American Methods

PAL = Peace, At Last

PAL-M = Pay a Little More